

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE

Informe Final

2019

Coordinado por:

Coordinación General de Adaptación
al Cambio Climático, INECC

Elaborado por:

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Iztapalapa

Margarita E. Gallegos Martínez
Patricia Ramírez Romero
Gilberto Hernández Cárdenas
Ivanhoe R. Herrera Moro Chao
Iliana Pérez Espinosa
Héctor Ocampo Álvarez
Isidro Arellano López
Gabriela Márquez Labastida
Fernando Valdez Cruz
Eduardo Hernández Elizalde
Romeo García Pacheco
Francisco Javier Ordoñez Gasca

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, 2° piso. Col.
Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan C.P. 4210
Ciudad de México Tel. +52 (55) 54246400.



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



gob.mx/inecc

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA**



Casa abierta al tiempo



INECC

INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

**INFORME FINAL FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE
DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE
SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN
LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES,
CAMPECHE.**

Octubre de 2019

Responsable del Proyecto

Dra. Margarita Elizabeth Gallegos Martínez

INFORME FINAL

**FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS
COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.**

Participantes:

Patricia Ramírez Romero

Gilberto Hernández Cárdenas

Ivanhoe Ricardo Herrera Moro Chao

Iliana Pérez Espinosa

Héctor Ocampo Álvarez

Isidro Arellano López

Gabriela Márquez Labastida

Fernando Valdez Cruz

Eduardo Hernández Elizalde

Romeo García Pacheco

Francisco Javier Ordoñez Gasca

Margarita Elizabeth Gallegos Martínez

Contenido

I.	INTRODUCCIÓN.....	X
II.	OBJETIVO	4
II.1.	Objetivos particulares.....	4
III.	METODOS	4
III.1.	Área de estudio.....	4
III.2.	Colecta en el campo y análisis en el laboratorio.	8
III.2.1	<i>Parámetros fisicoquímicos.....</i>	8
III.2.2	<i>Registro de la composición florística y cobertura de la VAS.....</i>	8
III.2.3	<i>Biomasa de VAS.....</i>	9
III.2.4	<i>Biomasa de Epifitas</i>	10
III.2.5	<i>Nutrientes en columna de agua y agua intersticial</i>	10
III.2.6	<i>Determinación de Carbono y Materia orgánica.....</i>	11
III.2.7	<i>Fauna Bentónica.....</i>	11
III.2.8	<i>Fotosíntesis</i>	13
III.2.9	<i>Medidas de Fluorescencia</i>	13
III.2.10	<i>Eficiencia Cuántica Máxima (F_v/F_m).....</i>	13
III.2.11	<i>La Tasa de transporte de electrones (ETR máx.).....</i>	14
III.2.12	<i>Irradiancia de saturación (E_k).....</i>	15
III.2.13	<i>Disipación térmica (NPQ)</i>	16
III.2.14	<i>Biomarcadores.....</i>	16
III.2.15	<i>Método de laboratorio para pastos marinos.....</i>	17
III.2.16	<i>Cuantificación de clorofilas</i>	18
III.2.17	<i>Determinación de proteínas.....</i>	19
III.2.18	<i>Determinación de lipoperoxidación.....</i>	19
III.2.19	<i>Cuantificación de azúcares totales</i>	19

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

III.2.20 Determinación de fenoles	20
III.2.21 Método de laboratorio para sedimentos.....	21
III.2.22 Construcción de mapas	21
III.2.23 Análisis estadísticos.....	21
IV. RESULTADOS	22
IV.1 Variación espacio temporal	22
IV.1.1 Parámetros fisicoquímicos	22
IV.1.2 Concentración de nutrientes en columna de agua	30
IV.1.3 Carbono orgánico.....	41
IV.1.4 Vegetación Acuática Sumergida	45
IV.1.5 Epífitas	54
IV.1.6 Organismos bentónicos.....	57
IV.1.6.1 Densidad y biomasa de macroinvertebrados bentónicos en la Reserva de la Biosfera Los Petenes.....	57
IV.1.6.2 Densidad de macroinvertebrados bentónicos por Transecto.	58
IV.1.6.3 Biomasa de macroinvertebrados bentónicos por Transecto.....	59
IV.1.6.4 Densidad de macroinvertebrados bentónicos por Estación.....	60
IV.1.6.5 Biomasa de macroinvertebrados bentónicos por Estación.....	60
IV.1.6.6 Discusión.....	63
IV.2 Evaluación del estado de salud en <i>Thalassia testudinum</i>	67
IV.2.1 Eficiencia cuántica del FSII (F_v/F_m).....	67
IV.2.2 Evaluación de la tasa fotosintética de <i>Thalassia testudinum</i> mediante el parámetro: Tasa de transporte de electrones del FSII (ETR_{max})	69
IV.2.3 Irradiancia de saturación de la fotosíntesis (E_k) en <i>Thalassia testudinum</i>	70
IV.2.4 Capacidad de fotoprotección del pasto marino <i>Thalassia testudinum</i> en la pradera marina de la reserva de la biosfera Los Petenes.	72
IV.3 BIOMARCADORES.....	73
IV.3.1 Clorofila a	75
IV.3.2 Clorofila b	76
IV.3.3 Clorofilas totales.....	78

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

<i>IV.3.4 Relación de clorofilas a/b</i>	79
<i>IV.3.5 Proteínas</i>	81
<i>IV.3.6 Lipoperoxidación</i>	82
<i>IV.3.7 Azúcares</i>	84
<i>IV.3.8 Fenoles</i>	85
<i>IV.3.9 Concentraciones de hidrocarburos en sedimentos.</i>	87
<i>IV.3.10 Pruebas de Correlación entre Biomarcadores y factores ambientales....</i>	89
<i>IV.3.11 Pruebas de Correlación entre Biomarcadores y HAPs</i>	92
<i>IV.3.12 Conclusiones</i>	94
<i>IV.3.13 Recomendaciones</i>	95
V. BIBLIOGRAFIA	96

Índice de Tablas

Tabla 1. Coordenadas de estaciones de muestreo en RBLP	8
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos medidos en la zona de estudio durante las temporadas de secas, lluvias y nortes.....	22
Tabla 3. Análisis de t-student y ANDEVA entre temporadas climáticas.....	24
Tabla 4. Estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos en los distintos sitios de muestreo durante las distintas épocas climáticas.....	26
Tabla 5. Resultados de las pruebas de ANOVA y Kruskal – Wallis para determinar la variación espacial durante las distintas épocas climáticas.....	28
Tabla 6. Estadística descriptiva de las concentraciones de nutrientes en columna de agua y en agua intersticial en Reserva de Los Petenes, así como el análisis de variación espacial mediante ANDEVA y Kruskal-Wallis.	32
Tabla 7. Estadística descriptiva de las concentraciones de nutrientes en las zonas muestreadas durante las distintas épocas climáticas en la Reserva de la Biósfera de Los Petenes.....	39
Tabla 8. Porcentaje de carbono orgánico en la Reserva de los Petenes durante las diferentes temporadas climáticas.	43
Tabla 9. Resultado de los análisis ANDEVA ($\alpha = 0.05$) para determinar la variación espacio-temporal del porcentaje de carbono en la Reserva de Los Petenes.	45
Tabla 10. Estadística descriptiva de la biomasa de la VAS durante 2015 en la Reserva de Los Petenes.....	50
Tabla 11. Distribución de biomasa de epifitas en las distintas estaciones de muestreo y durante las distintas épocas climáticas.	55
Tabla 12. Porcentajes de densidad y biomasa de organismos bentónicos separados por transectos en la Reserva de la Biosfera Los Petenes	62
Tabla 13. Resultados de biomarcadores en <i>Thalassia testudinum</i> en tres épocas del año.	74
Tabla 14. Estadística descriptiva de las concentraciones de hidrocarburos (ppb) detectadas en muestras de sedimentos asociados a pastos marinos en la RBLP.....	87
Tabla 15. Correlación entre biomarcadores y parámetros ambientales en RBLP.....	91
Tabla 16. Correlaciones entre los biomarcadores y los hidrocarburos aromáticos policíclicos detectados.	93

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Precipitación (mm) y temperatura (°C) promedio mensual 2001-2017 (CONAGUA, 2017).....	5
Gráfica 2. Cinética de emisión de fluorescencia. Las flechas negras indican el encendido de la luz de medida. Las flechas negras quebradas indican los pulsos de luz saturante. Con las flechas rojas se indica el encendido y apagado de la luz actínica y con las lilas el pulso del rojo lejano (Figuroa y Gómez, 2001).....	14
Gráfica 3. Curva Fotosíntesis contra Irradiancia y parámetros que pueden ser determinados a partir del ajuste a una función matemática: eficiencia fotosintética (α), tasa de transporte de electrones máxima (ETR _{máx}) e Irradiancia de saturación (E _k).	15
Gráfica 4. Diagrama de métodos de biomarcadores.	17
Gráfica 5. Distribución temporal de los distintos parámetros fisicoquímicos. A) temperatura, B) salinidad, C) concentración de oxígeno disuelto y D) concentración de sólidos totales disueltos (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	25
Gráfica 6. Distribución espacial de la concentración de sólidos totales disueltos a lo largo de un gradiente de salinidad durante: ● línea punteada roja representa la temporada de lluvias y ■ línea punteada azul correspondiente a temporada de nortes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	30
Gráfica 7. Variación temporal de las distintas concentraciones de nutrientes en la zona de estudio. A. Concentración de nitrógeno inorgánico disuelto, B. Fósforo reactivo soluble, C. Concentración de amonio en agua intersticial D. Fósforo reactivo soluble intersticial y E. Concentración de fósforo total intersticial. Las letras minúsculas dentro de los diagramas de caja y bigote representan los grupos resultados de la prueba de ANDEVA ($\alpha = 0.05$) y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	34
Gráfica 8. Distribución espacial durante la temporada de lluvias de las distintas concentraciones de nutrientes en columna de agua y agua intersticial en las distintas zonas de clasificación. A) Nitrógeno inorgánico disuelto en columna de agua, B) FRS en columna de agua, C) PT en columna de agua, D) Amonio en agua intersticial y E) Fósforo total en agua intersticial. Letras en minúsculas significan los grupos resultantes después de las pruebas de comparaciones múltiples. ■ = Mediana y barras = rango sin casos extraordinarios (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	36
Gráfica 9. Variación espacial de las concentraciones de nutrientes en columna de agua e intersticial durante la temporada de nortes en la zona de estudio. A) Amonio en columna de agua, B) Fósforo Reactivo Soluble en columna de agua, C) Fósforo Total en columna, D) Amonio en agua intersticial y E) Fósforo Reactivo Soluble en agua intersticial. Las letras en	

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

minúsculas corresponden a los distintos grupos resultado de la prueba de comparaciones múltiples, ■ = mediana y las barras corresponden al rango sin valores extraordinarios (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	38
Gráfica 10. Concentraciones de fósforo total a lo largo del gradiente de salinidad presentes durante las temporadas de lluvias y nortes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	41
Gráfica 11. Variación temporal del porcentaje de carbono orgánico durante secas, lluvias y nortes en la Reserva de los Petenes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	42
Gráfica 12. Variación temporal de los valores de biomasa de <i>T. testudinum</i> y macroalgas en la RBLP. A) biomasa total de <i>T. testudinum</i> , B) biomasa aérea de <i>T. testudinum</i> , C) biomasa subterránea de <i>T. testudinum</i> y D) biomasa de macroalgas. ● = valores extraordinarios y * = valores extremos (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	47
Gráfica 13. Relación de ln de la biomasa aérea con ln biomasa subterránea para <i>T. testudinum</i> , durante la temporada de A) Secas, B) Lluvias y C) Nortes, en el año 2015 (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	51
Gráfica 14. Variación espacial de la biomasa de macroalgas durante las tres épocas climáticas (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	53
Gráfica 15. Variación temporal de la biomasa de epifitas durante el 2015 en la Reserva de los Petenes. Las letras representan los distintos grupos resultado de las comparaciones múltiples de la prueba ANDEVA (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	54
Gráfica 16. Distribución espacial de biomasa epifita en <i>T. testudinum</i> . A) Diagrama de caja de biomasa epifita, B) Secas, C) Lluvias y D) Nortes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	56
Gráfica 17. Porcentaje de la densidad (a) y biomasa (b) de macroinvertebrados bentónicos a nivel de Clase en RBLP, Campeche, durante un ciclo anual (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	58
Gráfica 18. Porcentaje de la densidad (a, b y c) y biomasa (d, e y f) de macroinvertebrados bentónicos a nivel de Clase por transecto en la RBLP, Campeche (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	59
Gráfica 19. Porcentaje de la densidad (a, b y c) y biomasa (d, e y f) de macroinvertebrados bentónicos a nivel de Clase por estación en los transectos en la RBLP, Campeche (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	61
Gráfica 20. Eficiencia cuántica máxima (Fv/Fm) de <i>Thalassia testudinum</i> por sitio de estudio (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).....	68

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Gráfica 21. Tasa máxima de transporte de electrones por sitio para el especie <i>Thalassia testudinum</i> (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos)... 69	69
Gráfica 22. Irradiancia de saturación (E_k) por sitio, para el pasto marino <i>Thalassia testudinum</i> (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos)..... 71	71
Gráfica 23. Capacidad de fotoprotección (NPQmax) por sitio, para el pasto marino <i>Thalassia testudinum</i> (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos)... 72	72
Gráfica 24. Variación temporal de la concentración de clorofila <i>a</i> (mg g^{-1})..... 75	75
Gráfica 25. Variación temporal de la concentración de clorofila <i>b</i> (mg g^{-1})..... 77	77
Gráfica 26. Concentración de clorofila total durante secas, lluvias y nortes..... 78	78
Gráfica 27. Variación temporal de la relación de clorofila <i>a/b</i> 80	80
Gráfica 28. Distribución temporal de las concentraciones de proteínas en RBLP (mg/g). 81	81
Gráfica 29. Concentraciones de lipoperoxidación durante secas, lluvias y nortes (MDA nmol mg/proteína). 83	83
Gráfica 30. Variación temporal de azúcares totales (mg/g)..... 84	84
Gráfica 31. Concentración de fenoles durante secas, lluvias y nortes (mg/g)..... 86	86

Índice de Figuras

Figura 1. Registro de VAS mediante el uso de una ecosonda en RBLP (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos).....	9
Figura 2. Método de colecta de pastos marinos mediante el uso de un nucleador (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos).....	10
Figura 3. Método de colecta y análisis de sedimentos para porcentaje de carbono y materia orgánica (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos).	11
Figura 4. Método de colecta y análisis de muestra de fauna bentónica (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos).....	12
Figura 5. Proceso de cuantificación de clorofilas totales. a) Centrifugación de muestras b) Extractos listos para ser evaluados c) Lectura de las muestras (fotos tomadas por Isidro Arellano).....	18
Figura 6. Cuantificación de azúcares totales. a) adición de fenol. b) Muestras listas para ser evaluadas en el espectrofotómetro (fotos tomadas por Isidro Arellano).	20
Figura 7. Cuantificación de fenoles. a) Adición de solución de fenilfenol; b) Muestras listas para evaluación en espectrofotómetro (fotos tomadas por Isidro Arellano).....	20
Figura 8. Asociaciones de VAS ubicadas dentro de la RBLP. A) Parche monoespecífico de <i>T. testudinum</i> , B) asociación de <i>T. testudinum</i> y <i>S. filiforme</i> , C) asociación de <i>T. testudinum</i> y macroalgas y D) asociación de <i>T. testudinum</i> y <i>H. wrightii</i> (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos).	48
Figura 9. Colonización de epífitas sobre <i>T. testudinum</i> en estación B2 de RBLP (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos).....	57

Índice de Mapas

Mapa 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo, donde: A1, B1, C1, D1, E1, F1 son los sitios pegados a la costa; A2, B2, C2, D2, E2, F2 son los sitios medianamente alejados de la costa y los sitios A3, B3, C3, D3, E3, F3 son los sitios más alejados de la costa.	7
Mapa 2. Distribución espacial del porcentaje de carbono orgánico en la Reserva de los Petenes durante las diferentes épocas climáticas del 2015 (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	44
Mapa 3. Valores de porcentaje de cobertura de VAS en la reserva de la biosfera los Petenes, Campeche calculados mediante el uso de la ecosonda hidroacústica Biosonics (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	46
Mapa 4. Variación espacial de biomasa total de <i>T. testudinum</i> en la reserva de los Petenes durante distintas temporadas. A) secas, B) lluvias y C) nortes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	52
Mapa 5. Distribución de la eficiencia cuántica del FSII (Fv/Fm) en los pastos <i>Thalassia testudinum</i> . La barra de colores indica el valor del parámetro Fv/Fm (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	68
Mapa 6. Distribución de la Tasa máxima de transporte de electrones (ETRmax) en los pastos <i>Thalassia testudinum</i> de la Reserva de la Biosfera Los Petenes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	70
Mapa 7. Distribución de la irradiancia de saturación (Ek) en los pastos <i>Thalassia testudinum</i> de la Reserva de la Biosfera Los Petenes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).	71
Mapa 8. Variación espacial de las concentraciones de clorofila <i>a</i> en la RBLP.	76
Mapa 9. Distribución espacial de la concentración de clorofila <i>b</i>	77
Mapa 10. Distribución espacial de clorofila total.	79
Mapa 11. Distribución espacial de la relación de clorofila <i>a/b</i>	80
Mapa 12. Distribución espacial de la concentración de proteínas (mg/g).	82
Mapa 13. Distribución espacial de loperoxidación.	83
Mapa 14. Distribución espacial de la concentración de azúcares en RBLP.	85
Mapa 15. Distribución de la concentración de fenoles en RBLP.	87
Mapa 16. Concentraciones de a) acenafteno y b) acenaftlino en sedimento durante lluvias. .	89

INTRODUCCIÓN

Los Pastos Marinos crecen en las costas de todos los mares del mundo a excepción de los polares, y realizan todo su ciclo de vida estando totalmente sumergidos. Son susceptibles a los cambios ambientales como temperatura, salinidad, nutrientes, variaciones en el nivel del mar, intensidad luminosa, contaminación, cambios en patrones de sedimentación y erosión entre otras. La variación en estos parámetros tiene serias implicaciones en su distribución, abundancia, densidad, composición florística, biomasa, ciclo reproductivo, salud fotosintética, lo que los hace excelentes centinelas biológicos para determinar la salud de los ecosistemas (Eklöf *et al.*, 2008). A nivel mundial se reconoce una pérdida significativa de estas comunidades en todas las costas del mundo y son los factores de origen humano los que se identifican como los más frecuentes y graves que, sumados al incremento de fenómenos naturales como huracanes, tormentas incrementados a su vez por el cambio climático, ponen en riesgo su permanencia (Orth *et al.*, 2006; Waycott *et al.*, 2009). Adicionalmente, el calentamiento global constituye una amenaza más para las poblaciones de pastos marinos pues este fenómeno afecta la temperatura del agua, la luz, los nutrientes, el contenido de CO₂ del agua y el sustrato que son factores críticos para la supervivencia de los pastos marinos (Connolly, 2009).

De acuerdo con numerosos autores, la tasa de desaparición de las praderas de pastos marinos antes de 1940 fue <1% y desde 1980 esta tasa se ha incrementado a 5% (Waycott *et al.*, 2009). Una de las estrategias para evitar que se sigan perdiendo praderas, ha sido la creación de áreas críticas para la conservación de este valioso ecosistema costero.

En el Golfo de México las actividades relacionadas con la extracción, distribución y refinamiento del petróleo han sido muy intensas desde hace más de 70 años, lo que ha provocado una contaminación crónica en las áreas adyacentes, y se ha manifestado como aguda en eventos como el ocurrido durante el derrame de la Plataforma Deepwater Horizon de British Petroleum (BP) en abril de 2010.

Los pastos marinos son la comunidad que recibe en primera línea los efectos de la contaminación y para conocer los probables impactos que el petróleo podría ocasionar en los mismos, se efectuó un estudio de línea base a partir del año 2011 en las costas del Golfo de México. Este estudio nos permitió identificar que en la Reserva de la Biosfera Los Petenes en Campeche (RBLP), se desarrollan las comunidades de pastos marinos más extensas del país las cuales representan el 56% de toda la extensión que ocupan los pastos marinos en el Golfo de México.

Las condiciones de salud de los pastos y macroalgas que conforman la Vegetación Acuática Sumergida (VAS) en la RBLP, pueden determinarse mediante el análisis del desempeño fotosintético usando técnicas rápidas, sensibles y seguras como es la medición de la fluorescencia de la clorofila *a* y que han sido ya usadas en pastos marinos

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

(Beer *et al.*, 1998; Papageorgiou y Govindjee 2004; Baker, 2008; Enriquez y Borowitzka, 2010). La utilidad de esta técnica no se restringe a la medición de tasas de fotosíntesis, con la medición de la fluorescencia de la clorofila *a* es posible analizar las respuestas de los organismos fotosintéticos ante situaciones de estrés, tales como el efecto de cambios ambientales y la presencia de contaminantes. En la actualidad es una de las técnicas de elección para estudios de ecofisiología (García-Mendoza *et al.*, 2011; Ocampo-Alvarez *et al.*, 2013) y toxicología (Kumar *et al.*, 2014) de plantas y algas. Existen antecedentes de ensayos de exposición de pastos marinos a hidrocarburos del petróleo con y sin dispersantes químicos (Wilson y Ralph 2012), exposición a herbicidas (Kennedy *et al.*, 2012) y a metales tóxicos (Kumar *et al.*, 2014). En todos los casos mencionados, el uso de la fluorescencia de pulsos de amplitud modulada ha resultado la técnica más rápida, sensible y segura para detectar condiciones que afectan el proceso fotosintético y por lo tanto el estado de salud y la viabilidad de las plantas y pastos marinos.

Los parámetros fisiológico-fotosintéticos que comúnmente se han medido en estos ensayos son: la eficiencia cuántica máxima del fotosistema II (F_v/F_m), la irradiancia de saturación (I_k), la disipación térmica (NPQ), así como la concentración de pigmentos fotosintéticos y pigmentos fotoprotectores que contribuyen significativamente a entender los resultados de Fluorescencia.

Paralelamente también se utilizaron biomarcadores para evaluar su estado de salud. Los biomarcadores son respuestas o alteraciones bioquímicas, fisiológicas, morfológicas e histopatológicas de los organismos, ocasionados por la exposición a contaminantes y, en general, estas respuestas son rápidas, sensibles y en ocasiones, son reacciones específicas de los organismos a los contaminantes. De acuerdo con Cajaraville *et al.*, (2003) pueden interpretarse como “medidas en los niveles molecular, bioquímico o celular, tanto en poblaciones naturales provenientes de hábitats contaminados, como en organismos expuestos experimentalmente a contaminantes y que indican que el organismo ha estado expuesto a sustancias tóxicas y la magnitud de la respuesta del organismo al contaminante”.

En esta investigación se utilizaron como biomarcadores en los pastos marinos la concentración de clorofila, fenoles, proteínas y carbohidratos, así como la lipoperoxidación medida como malonaldehído para establecer una línea base de estas respuestas en la RBLP.

Estos biomarcadores se han utilizado con gran éxito en pastos marinos para evaluar su estado de salud. Por ejemplo, la evaluación de las clorofilas permite medir el estrés causado por las actividades antropogénicas, ya que dicho estrés causa una baja en la eficiencia de los fotosistemas, disminución en la fijación de CO_2 , pérdida del uso eficiente del agua, entre otras. El contenido de clorofila se ha correlacionado con diversas condiciones ambientales como la intensidad lumínica, la temperatura, la humedad relativa, presencia de plagas, densidad de población, fuente de nitrógeno, entre otras (Solarte *et al.*, 2005).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Así también, las reservas de carbohidratos juegan un papel importante en la resistencia de las plantas ante las perturbaciones, al servir como un "mecanismo de rescate" (Chapin *et al.*, 1990). Los pastos marinos tienen una red de rizomas y raíces (órganos de almacenamiento) que se localizan por debajo del subsuelo, estas estructuras sirven como reservas de carbohidratos para el crecimiento de la planta y su sobrevivencia durante los períodos de baja capacidad fotosintética. Debido a la acumulación de estas reservas, los pastos marinos, bajo una situación de estrés, mostrarán mayor contenido de carbohidratos en los tejidos de las hojas (Campbell *et al.*, 2012).

Las plantas responden a variaciones ambientales, como las ocasionadas por la época del año, la fertilización y los daños causados por plagas y enfermedades, lo cual influye en la producción de metabolitos secundarios (Strack, 1997). Los fenoles son metabolitos secundarios que regulan la actividad metabólica de los carbohidratos formados durante la fotosíntesis, una parte se emplearán en la conformación estructural de la planta (metabolismo primario) y otros en el metabolismo secundario, lo que tendrá una gran influencia en la cantidad y calidad de los compuestos fenólicos producidos (Pérez *et al.*, 2014).

La lipoperoxidación es un proceso complejo que se produce en plantas y animales debido a la presencia de radicales libres de oxígeno, que al generar la peroxidación en los organelos que cuentan con membranas lipídicas, como lo son el retículo endoplásmico, la mitocondria y los lisosomas, culmina en la eventual destrucción de dichas membranas lipídicas, produciendo además una variedad de productos de degradación, como son los aldehídos (Buege y Aust, 1978).

El Golfo de México es una de las regiones más grandes de producción de petróleo en el mundo, por lo que está considerada como zona de alto riesgo en cuanto a accidentes causados por derrames de petróleo; se calcula una producción de más de 3 millones de barriles por día de los cuales el 75% proviene de la Sonda de Campeche, movilizados por ductos submarinos con diversos destinos, como lo son bollas flotantes, puertos de almacenaje, transformación y refinación, originando un sitio propenso a sufrir las afectaciones que traen consigo las actividades ya mencionadas (Botello, 2005). Debido a la cercanía que presenta el área de estudio con la sonda de Campeche se puede decir que, es un área sensible a sufrir derrames de hidrocarburo, por lo que se consideró importante evaluar las concentraciones de hidrocarburos en los sedimentos asociados a los pastos marinos.

I. OBJETIVO

Evaluar la extensión y composición florística de las comunidades de pastos marinos, su estado de salud en términos de su eficiencia fotosintética, así como de biomarcadores de toxicidad, e identificar áreas potenciales al efecto de los hidrocarburos en los pastos marinos de la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche.

II.1. Objetivos particulares

- Conocer la composición florística, distribución y abundancia de las comunidades de pastos marinos, así como su eficiencia fotosintética.
- Evaluar una serie de bio marcadores en los pastos marinos y alguna otra especie asociada de la macrofauna bentónica.
- Elaborar un Atlas de Pastos Marinos del Golfo de México.

II. METODOS

III.1. Área de estudio.

La zona de estudio es la Reserva de la Biosfera Los Petenes (RBLP) en el estado de Campeche, tiene una superficie de 282,857 ha (CONANP, 2004). Se localiza al norte del estado de Campeche entre los 20°51'30" y 19°49'00" de latitud norte y los 90°45'15" y 90°20'00" de longitud oeste. Está ubicada entre los municipios de Campeche, Tenabo, Hecelchakán y Calkiní, así como la zona marina del Golfo de México que incluye desde la línea de costa hasta las 12 millas náuticas que corresponden al mar territorial (Diario Oficial de la Federación, 1999). Fue declarada sitio RAMSAR No. 1354 por presentar los ecosistemas de Petenes, reconociendo su valor como un humedal de importancia internacional (CONANP, sin fecha). De igual forma, la reserva queda comprendida dentro de las regiones prioritarias de México en todas las categorías existentes: Regiones Prioritarias Terrestres No. 145, Regiones Marinas Prioritarias No. 102 y Áreas de importancia para la Conservación de Aves-Acuáticas (Agraz-Hernández *et al.*, 2012).

La RBLP se ubica dentro de una planicie costera baja sujeta a inundaciones. Tiene poco contraste en altitud, ya que no superan los 10 m y las pendientes son menores al 0.5% (Ayala-Pérez *et al.*, 2016). Está conformada por una plataforma de estratos de rocas de

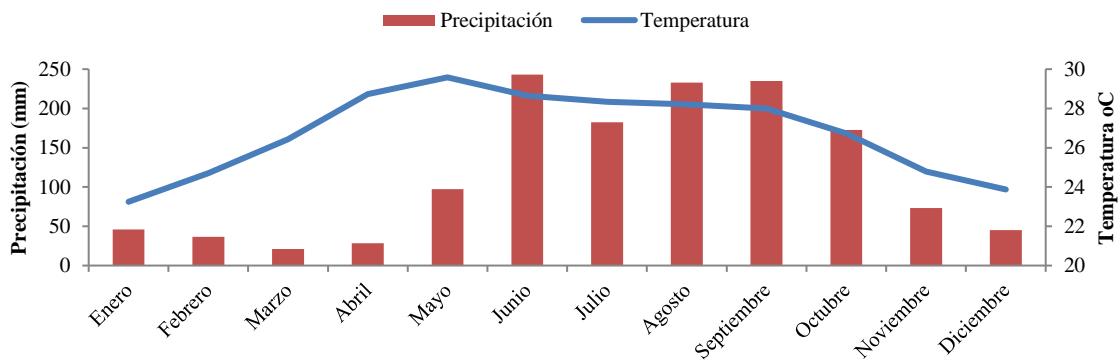
INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

origen sedimentario (marino), constituidas principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3) (CONANP, 2006). El origen cárstico de la península de Yucatán crea las condiciones para la formación de acuíferos subterráneos; el agua superficial está limitada a zonas de inundación temporal y permanente alimentadas por flujos hídricos locales y regionales (Agraz *et al.*, 2012).

De acuerdo con García (1988), se identifican dos tipos de climas: Aw (cálido subhúmedo con lluvias en verano) y BS'h'w (semiseco). Presenta tres estaciones bien definidas: secas que corresponde a los meses de marzo a mayo, lluvias de junio a octubre y frentes fríos o “nortes” de noviembre a febrero (Capurro, 2002).

La estacionalidad está determinada por la Corriente Tropical y la Corriente del Noroeste (Mendoza y Kú, 2010). La Corriente del Noroeste está formada por varias corrientes, provenientes de Estados Unidos y Canadá, generalmente son calientes y secas, pero en invierno son frías y húmedas y son las que producen los “Nortes”). La temperatura media anual varía entre de 26.7° a 27.8°C (CONANP, 2006), aunque se han reportado rangos de 21° a 30°C, siendo mayo el mes más cálido (Fuentes *et al.*, 2014). La precipitación oscila de 700 a 1,100 mm (CONANP, 2006). En el climograma de la Gráfica 1 se muestra la precipitación y temperatura promedio mensual en los últimos 16 años, en donde se puede observar claramente la estacionalidad de la zona de estudio.



Gráfica 1. Precipitación (mm) y temperatura (°C) promedio mensual 2001-2017 (CONAGUA, 2017).

La RBLP se identifica por la presencia de Petenes, que son pequeñas islas de vegetación arbórea (selva mediana perennifolia, subperennifolia y manglar) que se encuentran inmersas en medio de amplias zonas inundables (Ayala, 2010). Asimismo, se caracterizan por la disponibilidad de agua dulce proveniente de las corrientes

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

subterráneas que desembocan a través de ojos de agua y manantiales (Ayala-Pérez *et al.*, 2016).

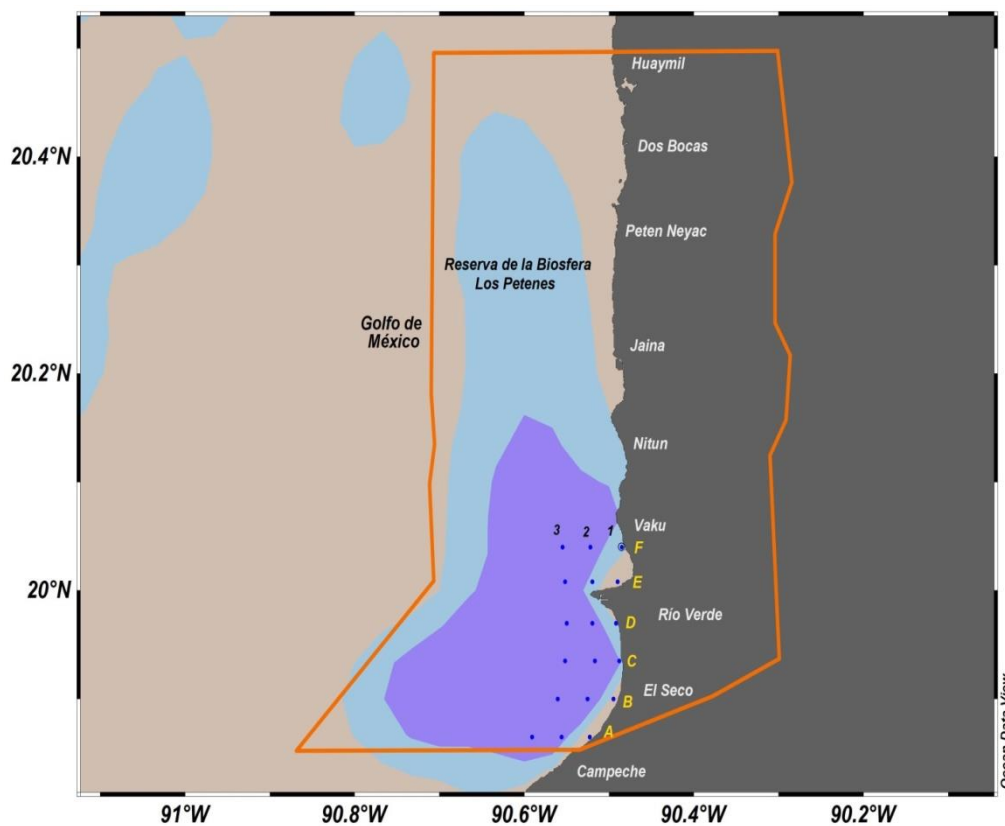
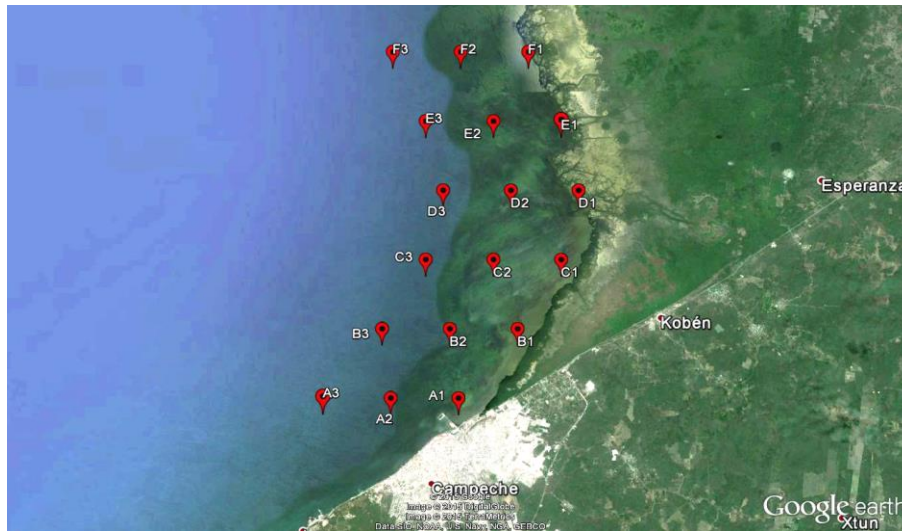
La vegetación acuática sumergida está constituida por comunidades de pastos marinos de las especies *Thalassia testudinum* (Banks ex Koenig), *Halodule wrightii* (Ascherson) y *Syringodium filiforme* (Kutz), así como algas clorofitas, feofitas y rodofitas, siendo el género *Caulerpa* el que destaca por su diversidad, cobertura y abundancia (Gallegos, 2010). La vegetación de la RBLP está compuesta por 678 especies de plantas superiores, incluyendo a 24 especies endémicas de la península de Yucatán.

Los sitios de colecta se muestran en el Mapa 1. Cabe mencionar que el diseño de muestreo tiene como antecedente el estudio previo de “Línea base de pastos marinos en el Golfo de México” con base en el cual se seleccionaron los sitios específicos de colecta dentro de RBLP. Para la colecta se trazaron 6 transectos (A, B, C, D, E, F) perpendiculares a la línea de costa, con tres puntos de colecta en cada uno (1,2,3); cada transecto está separado por una distancia aproximada de 4.6 km., el primer transecto (A) se ubica en el límite inferior del polígono de la Reserva de la Biosfera Los Petenes (RLBP) cercana a la Ciudad de San Francisco de Campeche, y F está a mayor distancia.

Los transectos y sitios de muestreo siguen un gradiente de profundidad, de tal forma que los sitios cercanos a la costa identificados como 1, tienen una profundidad entre 0.5 a 1.5m, los puntos 2 tiene profundidades de 2 a 3 m y los puntos 3, los más alejados de la costa se localizan a profundidades de 3.5 a 5.5m. Este diseño de muestreo permite estudiar los pastos marinos sujetos a un gradiente natural de variables ambientales tales como salinidad, temperatura, turbidez, intensidad de luz, profundidad, tipo de sedimentos entre otras; por lo que se puede utilizar como un proxy para la mayor parte de RBLP. La localización geográfica de cada uno de ellos se muestra en la Tabla 1.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Mapa 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo, donde: A1, B1, C1, D1, E1, F1 son los sitios pegados a la costa; A2, B2, C2, D2, E2, F2 son los sitios medianamente alejados de la costa y los sitios A3, B3, C3, D3, E3, F3 son los sitios más alejados de la costa.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 1. Coordenadas de estaciones de muestreo en RBLP

Coordenadas geográficas		
A1	19° 51' 54.00" N	90° 31' 15.60" W
A2	19° 51' 54.00" N	90° 33' 21.60" W
A3	19° 51' 54.00" N	90° 35' 27.60" W
B1	19° 54' 00.00" N	90° 29' 25.80" W
B2	19° 54' 00.00" N	90° 31' 31.80" W
B3	19° 54' 00.00" N	90° 33' 37.80" W
C1	19° 56' 06.00" N	90° 28' 04.80" W
C2	19° 56' 06.00" N	90° 30' 10.80" W
C3	19° 56' 06.00" N	90° 32' 16.80" W
D1	19° 58' 12.00" N	90° 27' 32.40" W
D2	19° 58' 12.00" N	90° 29' 38.40" W
D3	19° 58' 12.00" N	90° 31' 44.40" W
E1	20° 00' 18.00" N	90° 32' 16.80" W
E2	20° 00' 18.00" N	90° 30' 10.80" W
E3	20° 00' 18.00" N	90° 32' 16.80" W
F1	20° 02' 24.00" N	90° 29' 06.00" W
F2	20° 02' 24.00" N	90° 31' 43.30" W
F3	20° 02' 24.00" N	90° 33' 18.00" W

III.2. Colecta en el campo y análisis en el laboratorio.

Se realizó la toma de muestras en la Reserva de los Petenes a lo largo de las distintas épocas climáticas (secas = abril, lluvias = Julio y nortes = octubre del año 2015).

III.2.1 Parámetros fisicoquímicos

Se registraron *in situ* los parámetros fisicoquímicos de la columna de agua como la temperatura, salinidad, pH, concentración de oxígeno disuelto, porcentaje de saturación, sólidos totales disueltos y potencial óxido-reducción con una sonda YSI 556 MPS ya son los que influyen directamente a la comunidad de pastos marinos.

III.2.2 Registro de la composición florística y cobertura de la VAS

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

La extensión y cobertura de la VAS se realizó con una ecosonda Hidro acústica Biosonic, DT-X. Digital, también se tomaron registros videograbados y verificaciones *in situ* (Figura 1). La composición florística se determinó mediante colectas e identificación del material vegetal en el Herbario Metropolitano. En cada uno de los puntos establecidos de los 6 transectos, se colectaron simultáneamente muestras de VAS (pastos marinos y macro algas), fauna bentónica asociada, epifitas en hojas de *Thalassia testudinum*; hojas de pastos y frondas de macro algas para los análisis fotosintéticos, muestras de sedimentos para determinación de materia orgánica y carbono orgánico, agua intersticial de los sedimentos y de la columna de agua para determinación de nutrientes, y se registró con una sonda multiparámetrica YSI los valores de salinidad, temperatura, pH y O₂ disuelto.

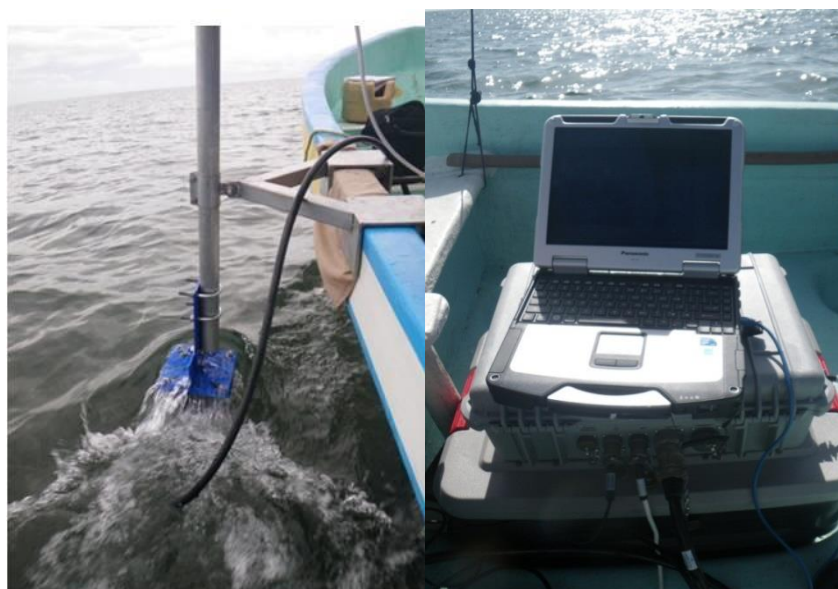


Figura 1. Registro de VAS mediante el uso de una ecosonda en RBLP (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos, 2015).

III.2.3 Biomasa de VAS

Para la colecta de biomasa de pastos marinos y macroalgas, se siguió la técnica usada previamente en zonas del Golfo de México por Gallegos *et al* (1993), utilizando un nucleador de acero inoxidable (Figura 2) con un área de muestreo de 0.03 m². Este se entierra a una profundidad de 40 cm dentro del sedimento para alcanzar las partes subterráneas (rizomas y raíces), y las partes aéreas (hojas y haces). En cada punto (18) de los 6 transectos, se obtuvieron tres réplicas de vegetación, de las cuales 9 fueron en poblaciones monoespecíficas de *Thalassia testudinum* y los 9 restantes correspondieron a comunidades mixtas de *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme* y macroalgas. Los

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

pastos se separaron en hojas y rizomas y raíces los cuales se secaron en una estufa durante 72 horas a 90°C.



Figura 2. Método de colecta de pastos marinos mediante el uso de un nucleador (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos, 2015).

III.2.4 Biomasa de Epifitas

En cada punto se obtuvieron 10 hojas de *T. testudinum* las cuales se rasparon con una espátula para obtener las epifitas utilizando agua marina para su hidratación, posteriormente las hojas fueron medidas para obtener su área en cm². Las epifitas se colectan con una pipeta Pasteur para filtrarlas con un equipo millipore utilizando filtros Whatman GF/F de 47 mm. Los filtros se maceraron con 13 ml de acetona al 90%, se colocaron en tubos cónicos y se centrifugaron a 4000 rpm durante 25 min, de acuerdo con la técnica descrita por Bruinsma (1963). La concentración se cuantificó con un espectrofotómetro Hach DR3900 siguiendo las ecuaciones propuestas por SCOR/UNESCO (1980).

III.2.5 Nutrientes en columna de agua y agua intersticial

Las muestras de columna de agua se colectan con una botella Van dorn de toma horizontal y filtradas a través de filtros Whatman GF/F y puestas en refrigeración para su transporte al laboratorio. Las muestras de agua intersticial se colectaron con un equipo diseñado exprofeso. Las muestras se filtraron a través de filtros GF/F para eliminar los materiales suspendidos y evitar su interferencia en los análisis, se guardaron en botellas y se mantuvieron en refrigeración para su análisis en el laboratorio.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

En el laboratorio se ajustó el pH para su correcto análisis. Se analizaron las concentraciones de fósforo reactivo soluble (FRS), fósforo total (PT), silicatos, amonio, nitratos y nitritos con técnicas espectrofotométricas con las técnicas descritas en el manual del laboratorio portátil HACH (HACH, 1992). Las concentraciones de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) fueron el resultado de la suma de las concentraciones de amonio y nitratos + nitritos.

III.2.6 Determinación de Carbono y Materia orgánica.

Los sedimentos se colectaron con núcleos de PVC de 5 cm de diámetro y 40 cm de longitud. Las muestras se preservaron a baja temperatura en hieleras hasta su procesamiento en el laboratorio (Figura 3).

En el laboratorio se segmentaron los núcleos y se tomaron 10 o 15 cm de la parte superior de cada una de las muestras. Los sedimentos se secaron en una estufa durante 48hr a 60°C. El porcentaje de C.O. se determinó mediante la técnica propuesta por Gaudette et al, (1974) que consiste en tamizar los sedimentos en una malla de 0.0625 mm, enseguida se realiza una oxidación con dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado, posteriormente se hace una titulación con sulfato ferroso.



Figura 3. Método de colecta y análisis de sedimentos para porcentaje de carbono y materia orgánica (fotos tomadas por el laboratorio de pastos marinos, 2015).

III.2.7 Fauna Bentónica

Para la colecta de los organismos bentónicos también se utilizó el nucleador de acero inoxidable, de 21 cm de diámetro y 42 cm de altura (Figura 4), con una capacidad en

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

volumen de 7.3 litros y abarca un área de 346.4 cm², está acerrada en la parte inferior para una mejor penetración en el sedimento y tamizado mediante una red cilíndrica con luz de malla de 1 mm.

Para cada punto de muestreo se efectuaron 3 réplicas y el material es tamizado *in situ* separando la totalidad de los pastos en hojas y rizomas; el material restante de sedimentos, conchas y organismos vivos es depositado en bolsas de plástico y fijadas para su preservación con alcohol etílico al 90% para su posterior análisis en el laboratorio. Las colectas se efectuaron a 3 diferentes distancias de la costa, reconocidas como “orilla” (cercana a la costa) “en medio” y “fuera, siendo esta última la más alejada de la costa.



Figura 4. Método de colecta y análisis de muestra de fauna bentónica (fotos tomadas por integrantes del laboratorio de pastos marinos, 2015).

En el laboratorio los macroinvertebrados bentónicos (mayores a 1 mm) son lavados, separados, determinados a nivel taxonómico de Clase, pesados, contados, re-etiquetados y envasados en frascos, usando como preservador alcohol metílico al 90%. La identificación taxonómica de la macrofauna bentónica se realiza empleando los métodos convencionales con base en literatura específica para los principales grupos taxonómicos: anélidos y poliquetos (Fauchald, 1977; Cruz-Ábrego *et al.*, 1994; Granados-Barba, 1994; Carrera y Salazar, 1997) moluscos (Rice, 1962; Abbott, 1974; Ekdale, 1974; Klima, 1976; Pérez-Rodríguez, 1980; Piña, 1980; García-Cubas, 1981; Vokes y Vokes, 1983; Cruz-Abrego, 1984; Reguero-Reza, 1994), crustáceos (decápodos, isópodos, anfípodos, peracaridos; Schultz, 1969; Perez-Farfante, 1970; Chace, 1972; Bousfield, 1973; Felder, 1973; Clark y Robertson, 1982; Williams, 1984; García-Montes, 1985; Abele y Kim 1986; Ledoyer, 1986; Kensley y Schotte, 1989; Pérez-Farfante, 1997; Ortiz *et al.*, 2004; Barba y Sánchez, 2005; Winfield *et al.*, 2007) y equinodermo (Caso-Muñoz *et al.*, 1994; Bravo-Tzompantzi *et al.*, 2000).

III.2.8 Fotosíntesis

En cada sitio de muestreo se colectaron 5 hojas de *Thalassia testudinum* las cuales se guardaron en bolsas de malla y se almacenaron dentro de una hielera con agua de mar colectada en el primer sitio de muestreo, después de mínimo 1 hora en la hielera se registraron los parámetros fotosintéticos para cada planta en el laboratorio. Las muestras fueron sometidas a aireación continua y se ajustó la temperatura a 32 °C para evitar el estrés fotosintético.

III.2.9 Medidas de Fluorescencia

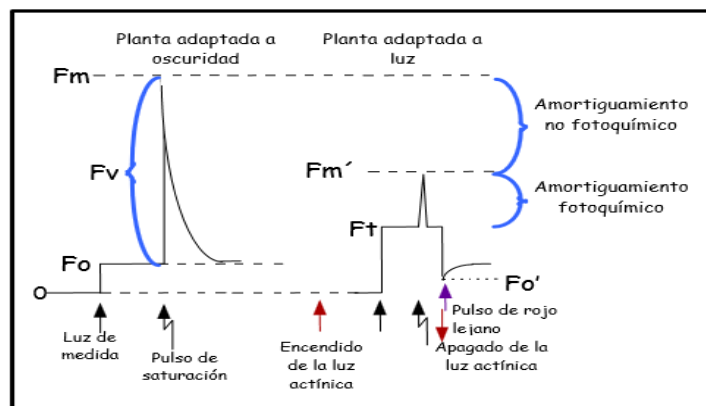
Para evaluar el estado del proceso de fotosíntesis se eligió medir la eficiencia cuántica máxima (F_v/F_m), la tasa máxima de transporte de electrones (ETR_{max}), la Irradiancia de saturación (E_k) y la disipación térmica (NPQ). Las mediciones de fluorescencia de clorofila *a*, se realizaron con un fluorómetro de pulsos de amplitud modulada JUNIOR PAM marca WALZ, cuya fuente de luz modulada tiene una emisión a 480 nm. Las muestras previamente aclimatadas a oscuridad se colocaron en el clip del equipo y se realizaron las mediciones de acuerdo a la metodología de cada parámetro como a continuación se describe.

III.2.10 Eficiencia Cuántica Máxima (F_v/F_m)

Este parámetro representa la eficiencia máxima en los procesos de conversión de la energía fotoquímica de una planta adaptada a oscuridad y es considerado un indicador del estado de salud del proceso de fotosíntesis (Figueroa *et al.*, 2003). Este parámetro corresponde al cociente entre la fluorescencia variable (F_v ; $F_v = F_m - F_0$) y la máxima fluorescencia de una planta aclimatada a oscuridad (F_m ; Gráfica 2). Para estimar este parámetro se aplicó un pulso de luz saturante de alta intensidad con el fluorómetro JUNIOR- PAM- WALZ y se midió la diferencia entre la fluorescencia máxima y la fluorescencia mínima.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 2. Cinética de emisión de fluorescencia. Las flechas negras indican el encendido de la luz de medida. Las flechas negras quebradas indican los pulsos de luz saturante. Con las flechas rojas se indica el encendido y apagado de la luz actínica y con las lilas el pulso del rojo lejano (Figueroa y Gómez, 2001)

III.2.11 La Tasa de transporte de electrones (ETR máx.)

Representa la estimación del tránsito de electrones a través de la cadena de transporte fotosintético. El $ETR_{máx}$ se estima utilizando curvas de Fotosíntesis vs. Irradiancia (P-I; Gráfica 3), mediante la exposición del pasto a intensidades crecientes de radiación visible PAR, proporcionada por una lámpara LED integrada en el instrumento JUNIOR-PAM WALZ.

ETR se calcula relacionando el rendimiento cuántico efectivo (Φ_{PSII}), que se refiere a la fluorescencia de una planta aclimatada a luz, ante un pulso de saturación y la intensidad de radiación PAR de acuerdo a la siguiente fórmula:

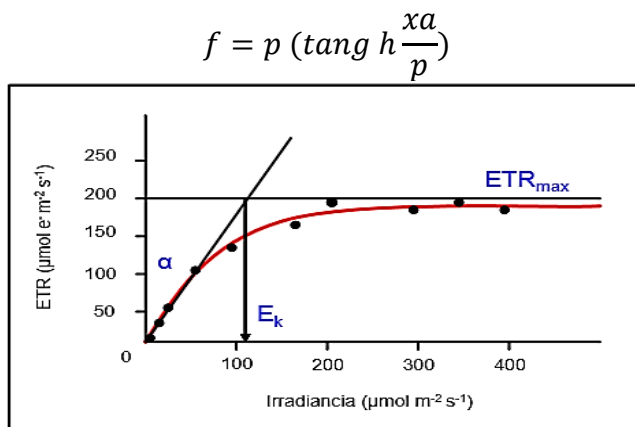
$$ETR = \Phi_{PSII} \cdot E_{PAR} \cdot 0.5 \cdot A$$

Donde:

- Φ_{PSII} es la eficiencia cuántica efectiva del FSII determinada como $(F'_m - F)/F'_m = \Delta F/F'_m$.
- F'_m y F son la fluorescencia máxima y mínima en presencia de luz actínica, respectivamente. - A , es la absorbancia, que es la fracción de luz realmente capturada por una muestra.
- E_{PAR} , es la intensidad lumínica aplicada en $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y el factor 0.5 se aplica debido a que para el transporte lineal de electrones se requiera la absorción de un mínimo de 2 fotones (Genty et al. 1989).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Las curvas de respuesta ETR vs. Irradiancia se llevaron a cabo mediante el uso de un programa del instrumento JUNIOR- PAM WALZ, el cual proporciona los parámetros: eficiencia fotosintética (α), tasa de transporte de electrones máxima ($ETR_{m\acute{a}x}$) e irradiancia de saturación (E_k). No obstante, los datos de cada curva se agruparon y se realizó un ajuste de los resultados al modelo matemático de tangente hiperbólica anclado en el programa Sigmaplot.



Gráfica 3. Curva Fotosíntesis contra Irradiancia y parámetros que pueden ser determinados a partir del ajuste a una función matemática: eficiencia fotosintética (α), tasa de transporte de electrones máxima ($ETR_{m\acute{a}x}$) e Irradiancia de saturación (E_k).

III.2.12 Irradiancia de saturación (E_k)

La irradiancia de saturación se obtiene al dividir $ETR_{m\acute{a}x}$ entre α y que equivale a la irradiancia a la cual la planta realiza su máxima tasa de fotosíntesis o en este caso su máxima tasa de transporte de electrones ($\mu\text{mol e- m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

$$E_k = \frac{ETR_{max}}{\alpha}$$

Donde, $ETR_{m\acute{a}x}$ es la tasa de transporte de electrones máxima definida como el ETR correspondiente a la asíntota en la cual ya no hay incremento en el transporte de electrones y α es la eficiencia fotosintética, definida como la pendiente inicial de la curva P-I ($\mu\text{mol e- m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ($\mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)⁻¹.

III.2.13 Disipación térmica (NPQ)

La disipación térmica (NPQ) es un mecanismo de foto protección, que consiste en eliminar en forma de calor el exceso de energía absorbida en el aparato fotosintético (Murata *et al.*, 2007). La disipación térmica se mide como la disminución de la emisión de fluorescencia de la clorofila a.

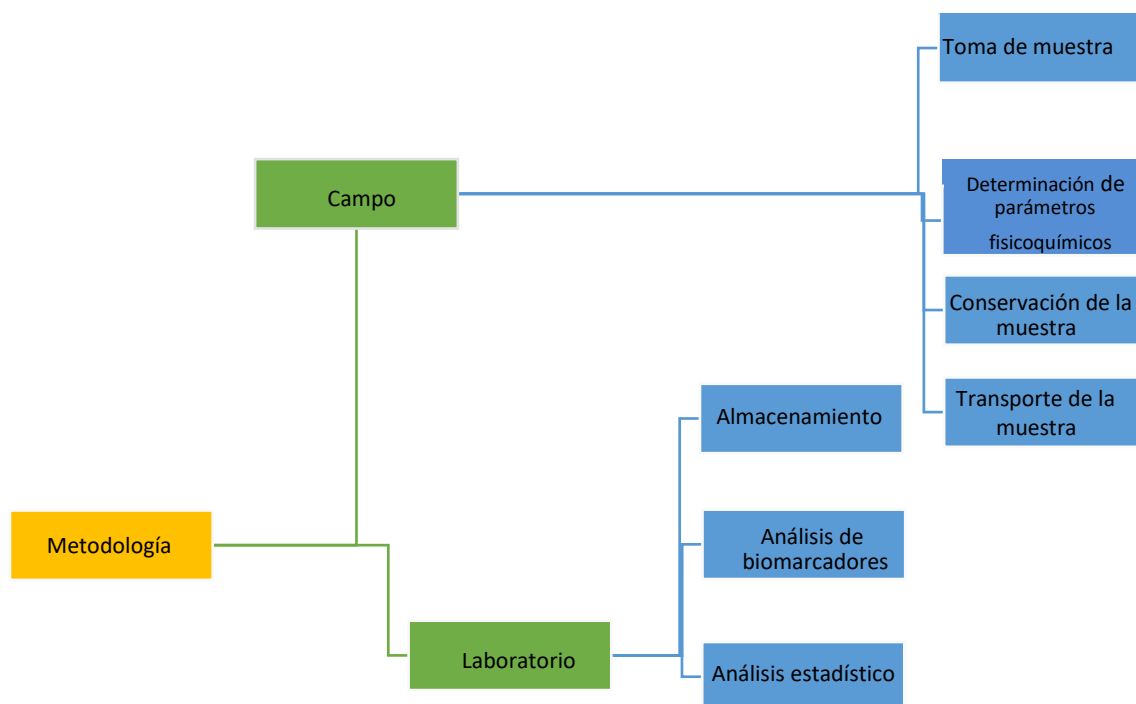
Se toma la hoja previamente aclimatada en obscuridad, esta se expone a un pulso saturante y después de un min se expone a la luz 1000 $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y se dan pulsos de saturación cada (30) segundos durante 5 minutos

$$NPQ = \left(\frac{F_m - F_m'}{F_m'} \right)$$

III.2.14 Biomarcadores

El método se dividió en dos partes (Gráfica 4). La primera se llevó a cabo en campo y consistió en la recolección de las muestras de pastos y sedimentos. La segunda parte se llevó a cabo en el laboratorio de Ecotoxicología de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, donde se emplearon procedimientos analíticos específicos, que más tarde se detallan, para evaluar los niveles de los biomarcadores seleccionados. Asimismo, las muestras para la determinación de hidrocarburos del petróleo se enviaron a los laboratorios del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) para su análisis.

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 4. Diagrama de métodos de biomarcadores.

Se tomaron las muestras de pastos y sedimentos en 18 sitios establecidos en tres líneas paralelas (1, 2 y 3) a la costa dentro de la RBLP durante las temporadas de lluvias, secas y nortes; las estaciones fueron identificada como A, B, C, D, E y F,

La toma de muestras se hizo en los 18 sitios seccionados, en un área de 0.3 m por sitio y se tomaron con un nucleador de 21 cm de diámetro, posteriormente las muestras se lavaron con agua destilada y se preservaron en bolsas de aluminio a 4°C para inhibir su metabolismo, y se transportaron en frío en hieleras, para su posterior análisis en el laboratorio (Ramírez et al. 2010).

III.2.15 Método de laboratorio para pastos marinos

Las muestras de pastos se lavaron con agua destilada y se cortaron en trozos de aproximadamente 2 cm² con la finalidad de que la muestra recolectada tuviera una mayor homogeneidad, posteriormente se realizó cada una de las determinaciones propuestas.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

III.2.16 Cuantificación de clorofilas

Se utilizó la técnica descrita por Arnon (1949) con algunas modificaciones (Figura 5). En la cual, se pesó 1 g de peso fresco de hojas de *T. testudinum*, previamente enjuagadas con agua destilada, las cuales se homogenizaron con 15 ml de acetona al 80%, en un homogeneizador para tejido marca Benchmark modelo D1000, se centrifugó (centrifuga J-600) dos veces a 5000 rpm durante 10 minutos y se extrajo el sobrenadante. Posteriormente, en un espectrofotómetro modelo 21D Spectronic se realizaron mediciones de las absorbancias a 645 y 663 nm siguiendo la siguiente ecuación:

$$\text{Clorofila total}(mg/gpf) = \frac{[(20.2)(OD_{645}) + (8.02)(OD_{663})]}{(a)(1000)(w)} (V)$$

gpf= gramos de peso fresco

V= Volumen de la muestra (25 mL)

α = Longitud de línea de luz en la célula (usualmente 1 cm)

w= peso fresco de la muestra en gramos

OD= Lectura de la absorbancia nm

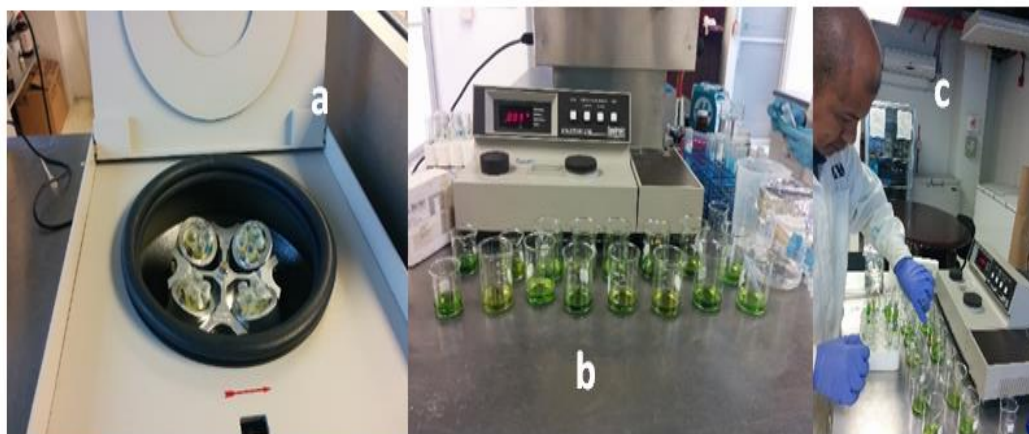


Figura 5. Proceso de cuantificación de clorofilas totales. a) Centrifugación de muestras b) Extractos listos para ser evaluados c) Lectura de las muestras (fotos tomadas por Isidro Arellano, 2015).

III.2.17 Determinación de proteínas

Se homogenizó 1g de tejido en 10ml de solución Tritón X-100 al 1 % (p/v), con una Micropipeta de repetición, se utilizó un filtro pur S 0.45 para extraer el sobrenadante y se conservaron para su análisis a -4°C posteriormente, se utilizó el método de Bradford (1976) para la determinación de proteínas, adaptado a microplaca (Herbert *et. al.* 1995).

Se empleó el reactivo Bradford de Bio-Rad como solución de reacción en una proporción 1:4 con agua destilada y albúmina de suero bovino (BSA) como estándar. Se emplearon 10 µl de cada muestra por cuadruplicado, 200 µl de colorante de Bio-rad y se leyeron en lector de Elisa a una longitud de onda de 630 nm.

III.2.18 Determinación de lipoperoxidación

Se utilizó la técnica de Buege y Aust (1978) con modificaciones. Se tomaron 300 µl del homogenizado (tejido y agua desionizada) y se agregaron 700 µl de regulador Tris-HCl, 150 µM pH 7.4 para completar 1 ml. Las muestras se metieron a incubación a 37°C por 30 minutos. Se agregaron 2 ml de ácido tiobarbitúrico al 0.375% p/v disuelto en ácido tricloroacético al 15%. Posteriormente, se calentaron hasta alcanzar la ebullición por 45 minutos para luego centrifugarlas a 3000 rpm por 10 minutos. Una vez obtenidas las extracciones se leyó el sobrenadante a 532 nm.

III.2.19 Cuantificación de azúcares totales

Se siguió la técnica de Dubois *et al.* (1956) para la cuantificación de los azúcares totales, la cual consistió en: enjuagar las muestras con agua destilada, se pesó 1 g de muestra de peso fresco de *T. testudinum*, se homogenizó con 10 ml de etanol al 80% y se centrifugó dos veces a 3000 rpm durante 10 minutos (Figura 6). Posteriormente, en un tubo Corning de 15 ml se agregó 1 ml del sobrenadante al cual se le adicionó 1 ml de solución de fenol al 5% y 5 ml de ácido sulfúrico, se homogenizó en hielo y se aforó a 15 ml con agua destilada. Su lectura fue tomada a una longitud de onda 490 nm y para la curva de calibración se usó glucosa.

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

a)

b)

Figura 6. Cuantificación de azúcares totales. a) adición de fenol. b) Muestras listas para ser evaluadas en el espectrofotómetro (fotos tomadas por Isidro Arellano, 2015).

III.2.20 Determinación de fenoles

Se utilizó la técnica de Swain y Hills (1959) con modificaciones, la cual consistió en los siguientes pasos: se pesaron 1 g de muestra de pasto marino (*T. testudinum*) previamente enjuagada con agua destilada, en 10 ml de etanol al 80% se homogenizó la muestra y se centrifugó a 3000 rpm por 10 minutos. En un tubo Corning se extrajo 1 ml de la muestra a la cual se le agregaron 3 ml de solución fenilfenol al 10% y 1 ml de solución saturada de bicarbonato de sodio, aforando a 12 ml; éste se agita y se colocó a baño María a 50 °C durante 30 minutos. Una vez que se obtuvieron los extractos se analizaron a una longitud de onda 630 nm (Figura 7).



Figura 7. Cuantificación de fenoles. a) Adición de solución de fenilfenol; b) Muestras listas para evaluación en espectrofotómetro (fotos tomadas por Isidro Arellano, 2015).

III.2.21 Método de laboratorio para sedimentos

Las muestras de sedimentos fueron enviadas y recibidas en los laboratorios del INECC (LINECC) el 25 de julio de 2016, pero por diversas razones se analizaron hasta mediados del año 2017, por lo que los resultados son considerados estimaciones al haber excedido el tiempo de almacenaje recomendado. El análisis de los hidrocarburos aromáticos policíclicos se hizo por cromatografía líquida de alta presión (HPLC) con el método EPA 8310 y los hidrocarburos de fracción pesada y media se analizaron con el método de cromatografía de gases ISO16703:2004. Los resultados fueron entregados por LINECC en el informe con folio LINEC/084/2016.

III.2.22 Construcción de mapas

Los resultados obtenidos de la cuantificación de los distintos biomarcadores en pasto marino (*Thalassia testudinum*) y de las concentraciones de algunos hidrocarburos en sedimentos, fueron desplegados sobre mapas mediante el programa Ocean Data View (ODV).

III.2.23 Análisis estadísticos

Para analizar la variación espacio-temporal se realizó un análisis exploratorio de datos para conocer la distribución de los resultados, los valores promedios y su desviación estándar. Se analizó la normalidad de los datos mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov (prueba K-S) y se comparó entre épocas utilizando pruebas ANDEVA de dos vías (temporada y transecto) o pruebas de Kruskal-Wallis.

Se llevó a cabo un análisis de correlación de Pearson entre los biomarcadores y los parámetros fisicoquímicos y los biomarcadores y las concentraciones de hidrocarburos en sedimentos.

Posteriormente, se realizó un análisis multivariado de factores ambientales y de biomarcadores indicadores de estrés en pastos marinos considerando las tres estaciones de temporalidad: secas, lluvias y nortes.

III. RESULTADOS

IV.1 Variación espacio temporal

IV.1.1 Parámetros fisicoquímicos

En la RBLP los parámetros fisicoquímicos evaluados presentaron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) entre temporadas climáticas en donde la temperatura registró sus mayores valores durante la temporada de secas con una mediana de 29.82 ± 0.71 °C y una máxima de 32.84 °C (Tabla 2), mientras que la menor se registró durante la temporada de nortes (27.80 ± 0.81 °C) y con una mínima de 25.50 °C (Gráfica 5A).

El pH fue diferente en la época de lluvias (Tabla 2) con valores más bajos (7.97 ± 0.09) mientras que en la época de nortes los valores fueron más altos (8.43 ± 0.23). Cabe mencionar que este parámetro fue el más estable de todos los medidos con coeficientes de variación menores al 3% entre las distintas épocas climáticas (0.57, 1.06 y 2.27 % para secas, lluvias y nortes).

Con base en la salinidad y con lo expuesto por (Por, 1972) hubo un cambio estacional en las masas de agua del sistema de tal manera que en secas y lluvias fue de tipo metahalina (42.98 ± 6.17 y 43.37 ± 1.05 respectivamente) con una máxima de 45.98 (Tabla 3); en la época de nortes la masa de agua en la zona de estudio fue de tipo mixoeuhalina con una mediana de 33.38 ± 3.48 , con una mínima de 23.27 lo cual corresponde a masas de agua de tipo polihalino (Gráfica 5B).

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos medidos en la zona de estudio durante las temporadas de secas, lluvias y nortes.

	Parámetros	Pseudo			Min	Max
		Mediana	σ	CV%		
	Temperatura (°C)	28.700	1.273	4.581	25.500	32.840
	pH	8.340	0.232	2.743	7.830	8.600
	Salinidad	42.975	6.173	14.557	23.270	45.980
General	O. D. (mg l ⁻¹)	5.710	1.079	25.055	2.650	9.280
	Porcentaje de saturación de oxígeno (%)	68.835	14.770	18.292	41.500	93.600
	STD (g l ⁻¹)	41.275	5.547	13.160	23.260	43.980

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

	POR (mV)	-98.150	10.767	13.165	-	121.300	-64.400
Secas	Temperatura (°C)	29.820	0.708	3.333	28.570	32.840	
	pH	8.340	0.000	0.565	8.340	8.540	
	Salinidad	43.365	1.054	2.291	40.850	43.880	
	O. D. (mg l⁻¹)	6.185	0.914	21.130	4.220	9.280	
	Porcentaje de saturación de oxígeno (%)	67.855	9.544	15.180	54.800	90.700	
	STD (g l⁻¹)	41.895	1.042	2.061	39.710	42.550	
	POR (mV)	-106.400	10.934	10.448	116.500	-	-80.300
Lluvias	Temperatura (°C)	28.525	0.686	2.740	26.200	29.420	
	pH	7.965	0.089	1.058	7.830	8.130	
	Salinidad	44.830	1.475	3.109	41.580	45.980	
	O. D. (mg l⁻¹)	6.115	0.895	14.330	5.010	8.730	
	Porcentaje de saturación de oxígeno (%)	69.850	16.531	17.303	57.910	93.600	
	STD (g l⁻¹)	42.565	1.249	2.709	40.250	43.980	
	POR (mV)	65.395	2.068	2.810	61.940	67.650	
Nortes	Temperatura (°C)	27.800	0.808	3.930	25.500	29.970	
	pH	8.425	0.228	2.271	8.090	8.600	
	Salinidad	33.380	3.480	11.475	23.270	37.600	
	O. D. (mg l⁻¹)	4.125	1.247	25.366	2.650	6.110	
	Porcentaje de saturación de oxígeno (%)	64.000	20.441	23.495	41.500	87.200	
	STD (g l⁻¹)	32.540	2.900	10.167	23.260	36.290	
	POR (mV)	-98.250	4.948	6.454	112.800	-	-91.700

POR = Potencial óxido - reducción; STD = Sólidos Totales Disueltos

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 3. Análisis de t-student y ANDEVA entre temporadas climáticas.

Parámetro	Tipo de prueba	Valor de F o t	Valor de P	Grupo distinto
Temperatura (°C)	ANOVA	7.470	0.003	Secas Lluvias -
pH	t-student	-8.319	0.000	Nortes
Salinidad	ANOVA	66.448	0.000	Nortes
O. D. (mg l⁻¹)	ANOVA	10.667	0.000	Lluvias - Nortes
Porcentaje de saturación de oxígeno (%)	ANOVA	0.651	0.530	-
STD (g l⁻¹)	ANOVA	80.470	0.000	Nortes
POR (mV)	ANOVA	1.433	0.257	-

Las concentraciones de oxígeno disuelto en el sistema siempre estuvieron por arriba de la hipoxia (concentración menor a 2 mg l⁻¹; Murrell y Lehrter, 2011), es importante mencionar que de los parámetros fisicoquímicos medidos este fue el que presentó mayor variación. Se presentaron diferencias significativas (p = 0.000; Tabla 3) entre la temporada de lluvias y nortes, siendo la primera la de mayor concentración con 6.12 ± 0.90 mg l⁻¹ mientras que en nortes se registró una mediana de 4.13 ± 1.25 mg l⁻¹ (Gráfica 5C). Dichas concentraciones representadas en porcentaje de saturación siempre fueron menores al 70% con valores para secas, lluvias y nortes de 67.86 ± 9.54, 69.85 ± 16.53 y 64.00 ± 20.44 % respectivamente; y en ninguna estación se superó el 100 % de saturación.

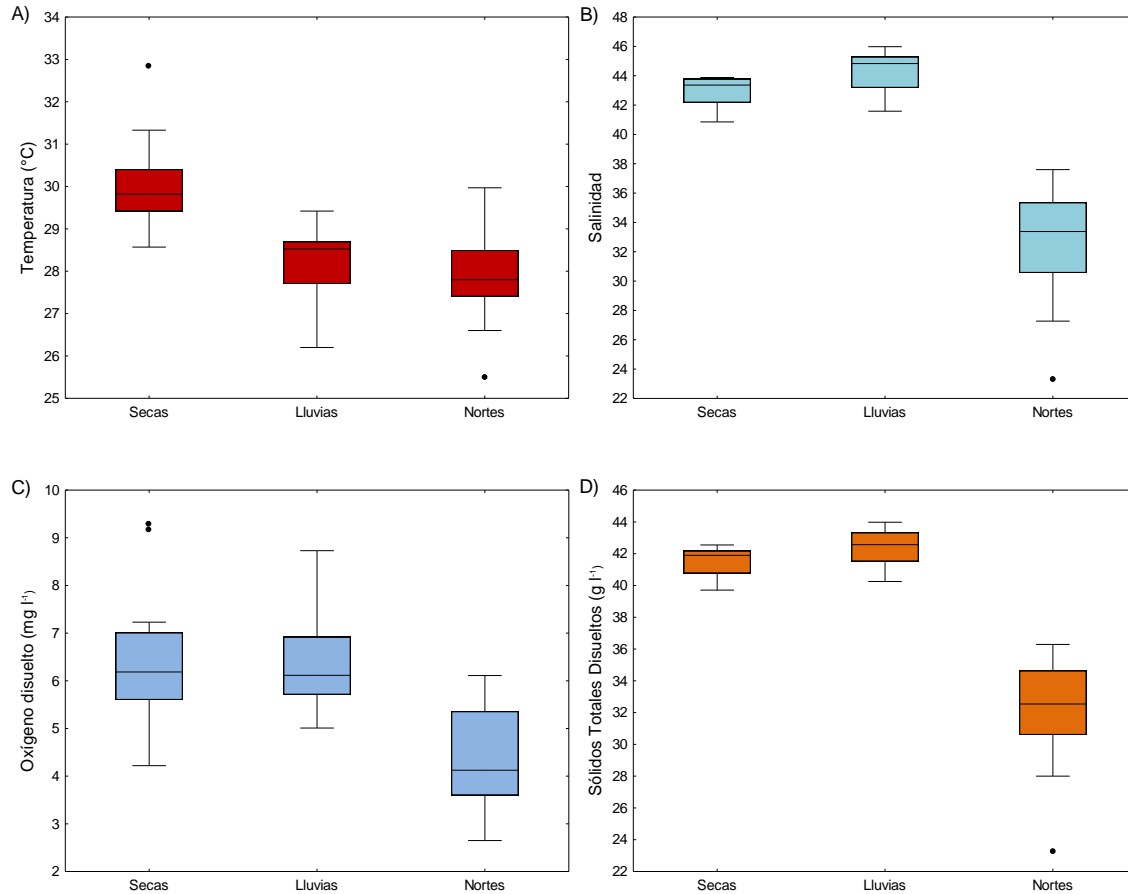
En la temporada de nortes se midió la menor concentración de sólidos totales disueltos (mediana = 32.54 ± 2.90 g l⁻¹) la cual fue significativamente diferente de las temporadas de secas y lluvias respectivamente (Tabla 2).

El único parámetro que no presentó una variación temporal definida fue el potencial óxido-reducción (POR), el cual tuvo una mediana anual de -98.15 ± 10.77 mV, lo que significa que las condiciones del medio siempre fueron reductoras.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Con respecto a la distribución espacial, se analizaron las diferencias significativas entre todas las estaciones, durante las distintas épocas climáticas.



Gráfica 5. Distribución temporal de los distintos parámetros fisicoquímicos. A) temperatura, B) salinidad, C) concentración de oxígeno disuelto y D) concentración de sólidos totales disueltos (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 4. Estadística descriptiva de los parámetros fisicoquímicos en los distintos sitios de muestreo durante las distintas épocas climáticas.

	Parámetros	Secas				Lluvias				Nortes			
		Mediana	Pseudo σ	Min	Max	Mediana	Pseudo σ	Min	Max	Mediana	Pseudo σ	Min	Max
Cercana a costa	Temperatura (°C)	30.875	0.638	29.810	32.840	28.190	0.967	26.200	29.420	28.150	1.686	25.500	29.700
	pH	8.373	0.000	8.340	8.540	7.960	0.128	7.870	8.130	8.350	0.272	8.100	8.600
	Salinidad	42.175	1.334	40.850	43.780	43.105	1.095	41.580	43.780	29.040	2.289	23.270	30.700
	O. D. (mg l ⁻¹)	6.635	2.659	4.220	9.280	5.710	0.751	5.010	8.730	4.025	1.299	3.200	5.580
	Porcentaje de saturación (%)	70.635	8.912	59.900	88.200	74.760	16.342	60.700	93.600	57.700	18.514	48.800	82.400
	STD (g l ⁻¹)	40.908	1.216	39.710	42.280	41.360	0.982	40.250	42.110	29.310	1.861	23.260	31.900
	POR (mV)	-94.317	12.509	-113.900	-80.300	-100.450	7.079	-121.300	-91.900	-108.650	4.967	-112.800	-101.100
Intermedia	Temperatura (°C)	29.585	0.315	28.570	30.410	28.640	0.367	27.610	29.170	27.750	0.608	27.280	28.800
	pH	8.340	0.000	8.340	8.340	7.980	0.044	7.900	8.050	8.425	0.195	8.100	8.600
	Salinidad	43.640	0.532	42.920	43.880	45.350	0.441	42.920	45.970	35.220	1.108	34.230	36.950
	O. D. (mg l ⁻¹)	6.075	0.617	5.400	7.010	5.980	0.374	5.480	6.920	4.455	0.901	3.800	5.360
	Porcentaje de saturación (%)	64.550	6.690	54.800	69.800	69.500	5.133	57.910	89.600	71.000	13.213	60.500	83.100

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 4. Continuación

	STD (g l⁻¹)	42.055	0.258	41.500	42.550	43.130	0.815	41.350	43.980	34.785	1.004	33.890	36.290
	POR (mV)	-110.000	3.558	115.700	-98.500	-71.400	5.967	-94.700	-64.400	-94.850	1.983	-97.800	-91.700
	Temperatura (°C)	29.450	0.556	28.860	30.830	28.170	0.395	27.700	28.820	27.750	0.524	27.200	29.970
	pH	8.340	0.000	8.340	8.340	7.935	0.100	7.830	8.050	8.400	0.176	8.090	8.600
	Salinidad	43.400	0.306	42.170	43.800	45.080	0.367	43.600	45.980	33.735	2.821	30.980	37.600
Alejadas a costa	O. D. (mg l⁻¹)	6.185	0.573	5.510	7.230	6.810	0.465	5.570	7.200	4.295	1.698	2.650	6.110
	Porcentaje de saturación (%)	73.635	12.330	60.700	90.700	76.355	14.861	62.900	91.600	66.400	24.351	41.500	87.200
	STD (g l⁻¹)	41.840	0.752	40.680	42.180	43.200	0.304	41.950	43.970	32.540	1.701	31.000	35.260
	POR (mV)	-110.200	7.543	116.500	-98.000	-94.300	7.635	-97.400	-81.400	-98.100	1.279	-99.700	-94.100

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 5. Resultados de las pruebas de ANOVA y Kruskall – Wallis para determinar la variación espacial durante las distintas épocas climáticas.

Parámetro	Tipo de prueba	Secas			Lluvias			Nortes		
		Valor de F o H	P	Tipo de prueba	Valor de F o H	P	Tipo de prueba	Valor de F o H	P	
Temperatura (°C)	ANOVA	8.540	0.007	ANOVA	1.110	0.366	ANOVA	0.080	0.928	
pH	Kruskall - Wallis	2.000	0.368	ANOVA	0.300	0.716	Kruskall - Wallis	0.021	0.986	
Salinidad	Kruskall - Wallis	4.015	0.134	ANOVA	10.180	0.004	ANOVA	41.708	0.000	
O. D. (mg l ⁻¹)	ANOVA	0.182	0.836	ANOVA	0.423	0.667	ANOVA	0.161	0.853	
Porcentaje de saturación (%)	ANOVA	2.175	0.164	ANOVA	1.472	0.275	ANOVA	0.960	0.416	
STD (g l ⁻¹)	Kruskall - Wallis	2.778	0.249	ANOVA	8.430	0.007	ANOVA	33.840	0.000	
ORP (mV)	ANOVA	10.930	0.003	ANOVA	13.509	0.002	ANOVA	43.480	0.000	

Nota: datos en color rojo correspondieron a los valores que presentaron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

En la época de secas se observó un gradiente de temperatura en función a la profundidad, de manera que las estaciones más cercanas a la costa fueron las más cálidas (Tabla 4) con una mediana de 30.49 ± 0.64 °C mientras que en las más alejadas la temperatura fue menor 29.59 ± 0.32 °C.

De igual manera el POR mostró un patrón espacial similar siendo las estaciones cercanas a la costa con condiciones menor reductoras (-90.40 ± 12.51 mV; $F_{(2,17)} = 10.93$; $p = 0.003$) con relación a las estaciones más alejadas que tuvieron valores más elevados (-110.20 ± 7.54 mV).

Durante la temporada de lluvias se presentó un gradiente de salinidad, donde las estaciones localizadas más cercanas a la costa tuvieron menor salinidad mientras que las más alejadas registraron la mayor salinidad; cabe mencionar que aunque haya habido diferencias significativas (Tabla 5), en toda la zona de estudio se presentó una masa de agua de tipo metahalina.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

El POR nuevamente presentó variaciones espaciales a lo largo del gradiente de salinidad, sin embargo, dichas variaciones fueron contrarias a las ocurridas durante la temporada de secas, ya que los valores más elevados de POR se presentaron en las estaciones cercanas a la línea de costa (-103.73 ± 7.08 mV), esta condición reducida del ambiente se mantuvo, pero fue de menor intensidad en las estaciones de fuera (-73.95 ± 5.97 mV).

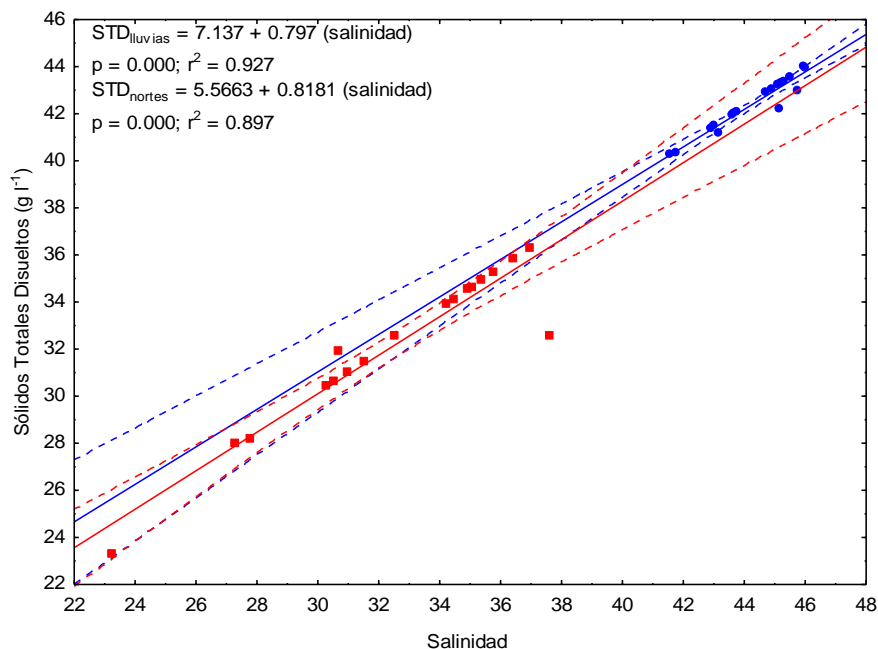
Por último los sólidos totales disueltos (STD) también presentaron un patrón creciente a lo largo del gradiente de salinidad de tal manera que las estaciones cercanas a la costa fueron diferentes significativamente de las más alejadas ($F_{(2,17)} = 8.43$; $p = 0.007$) con medianas de 41.36 ± 1.44 y 43.13 ± 0.82 respectivamente.

Durante la temporada de nortes se registró un gradiente de salinidad perpendicular a la línea de costa, de tal manera que las estaciones cercanas fueron las de menor salinidad (Tabla 4) con dos masas de agua distintas una zona polihalina y otra correspondiente a mixoeuhalina, mientras que en las estaciones lejanas todas las estaciones fueron mayores a valores de 30 (correspondientes a mixoeuhalinas).

De igual manera los sólidos totales disueltos presentaron diferencias significativas a lo largo del gradiente de salinidad (Gráfica 6) siendo las estaciones con valores más bajos las más cercanas a la costa, mientras que las mayores concentraciones de sólidos totales disueltos se ubicaron en la zona más alejada a la costa.

Igual que durante la temporada de lluvias el POR presentó una condición mayormente reductora en la costa (-108.65 ± 4.97 mV) la cual fue disminuyendo conforme aumenta la salinidad o alejándose de la costa registrando una mediana de -94.85 ± 1.98 mV y con una mínima de -91.7 mV.

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 6. Distribución espacial de la concentración de sólidos totales disueltos a lo largo de un gradiente de salinidad durante: ● línea punteada roja representa la temporada de lluvias y ■ línea punteada azul correspondiente a temporada de nortes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

IV.1.2 Concentración de nutrientes en columna de agua

Se analizaron las concentraciones de nutrientes en columna de agua y en agua intersticial y fueron: nitrógeno inorgánico disuelto (NID), que se define como la suma de las concentraciones de amonio, nitratos + nitritos, de fósforo reactivo soluble (FRS), fósforo total (PT) y fósforo orgánico disuelto (FOD) definido como la sustracción de la concentración de FRS a la concentración de PT. En el caso de los nutrientes en agua intersticial se analizaron únicamente las concentraciones de amonio (NH_{4inter}), dado que esta es la principal forma nitrogenada utilizada por productores primarios bentónicos como los pastos marinos (Agawin *et al.*, 2017); de igual manera se analizaron las concentraciones de fósforo reactivo soluble (FRS_{inter}) y el fósforo total en agua intersticial (PT_{inter}).

Dichos nutrientes presentaron patrones estacionales en la zona de estudio en donde el NID en columna de agua fue menor en la época de nortes (Med = $1.63 \pm 0.21 \text{ mg l}^{-1}$; $F_{(2,53)} = 12.855$, $p = 0.000$) mientras que las mayores concentraciones se registraron durante la temporada de secas ($2.86 \pm 0.48 \text{ mg l}^{-1}$; Tabla 6). Estas concentraciones fueron las más estables de todos los nutrientes medidos con CV% menores del 30%. La concentración mínima registrada fue durante la temporada de lluvias 1.66 mg l^{-1} , mientras que la máxima fue durante la temporada de secas con 4.43 mg l^{-1} (Gráfica 7A).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

En el caso de las formas fosfatadas, el FRS presentó diferencias significativas ($F_{(2,53)} = 13.019$, $p = 0.000$) siendo la temporada de secas la que presentó la mayor concentración, con una mediana de $0.45 \pm 0.42 \text{ mg l}^{-1}$ (Tabla 6) y con una máxima de 1.99 mg l^{-1} , mientras que la menor concentración se registró durante la temporada de lluvias (Med = $0.07 \pm 0.04 \text{ mg l}^{-1}$), con una mínima de 0.02 mg l^{-1} (Gráfica 7B).

Las concentraciones de PT se mantuvieron estables a lo largo de un ciclo anual, registrándose durante secas, lluvias y nortes medianas de 2.45 ± 1.50 , 3.10 ± 0.61 y $3.45 \pm 0.83 \text{ mg l}^{-1}$ respectivamente (Tabla 6).

El aporte del FOD a las concentraciones de fósforo total fue diferente a lo largo de las distintas temporadas climáticas, siendo la temporada de secas la que presentó una mayor variación y un menor aporte con una mediana de $72 \pm 15.59 \%$, la cual aumenta de manera significativa durante la temporada de lluvias y se mantuvo durante nortes alcanzando porcentajes de 97.76 ± 1.31 y $97.46 \pm 0.83 \%$ respectivamente.

En el caso de las concentraciones de nutrientes en agua intersticial la temporalidad tuvo un efecto que se distinguió entre las temporadas climáticas. Tal fue el caso del amonio, que fue mayor durante la temporada secas ($F_{(2,53)} = 8.469$; $p = 0.001$) con una mediana $0.53 \pm 0.57 \text{ mg l}^{-1}$; en la temporada de lluvias las concentraciones de amonio en sedimento disminuyeron (mediana = $0.05 \pm 0.02 \text{ mg l}^{-1}$) las cuales aumentaron durante la temporada de nortes (mediana = $0.17 \pm 0.04 \text{ mg l}^{-1}$; Gráfica 7).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 6. Estadística descriptiva de las concentraciones de nutrientes en columna de agua y en agua intersticial en Reserva de Los Petenes, así como el análisis de variación espacial mediante ANDEVA y Kruskal-Wallis.

	Nutriente	Mediana	Pseudo σ	CV%	Min	Max	Tipo de prueba	p	Grupo distinto
Secas	NID (mg l ⁻¹)	2.855	0.482	22.295	1.950	4.430	ANDEVA	0.758	-
	FRS (mg l ⁻¹)	0.445	0.419	117.257	0.110	1.990	K-W	p > 0.05	-
	PT (mg l ⁻¹)	2.450	1.501	54.316	1.000	5.200	ANDEVA	0.241	-
	NH₄_{inter} (mg l ⁻¹)	0.530	0.571	346.602	0.090	6.220	K-W	p > 0.05	-
	FRS_{inter} (mg l ⁻¹)	0.625	0.791	187.946	0.090	4.900	K-W	p > 0.05	-
	PT_{inter} (mg l ⁻¹)	4.050	1.631	52.816	1.900	9.600	K-W	p > 0.05	-
Lluvias	NID (mg l ⁻¹)	2.510	0.869	26.616	1.660	3.600	ANDEVA	0.044	fuera - dentro
	FRS (mg l ⁻¹)	0.065	0.041	180.745	0.020	0.420	K-W	p < 0.05	fuera - dentro
	PT (mg l ⁻¹)	3.100	0.612	41.017	0.500	5.300	ANDEVA	0.031	fuera - dentro
	NH₄_{inter} (mg l ⁻¹)	0.050	0.052	460.169	0.020	1.020	K-W	p < 0.05	fuera - dentro
	FRS_{inter} (mg l ⁻¹)	0.400	0.363	91.936	0.050	1.270	ANDEVA	0.003	fuera - dentro
	PT_{inter} (mg l ⁻¹)	1.850	1.779	80.235	0.600	4.900	ANDEVA	0.095	-
Nortes	NID (mg l ⁻¹)	1.625	0.208	12.572	1.180	1.940	ANDEVA	0.000	fuera
	FRS (mg l ⁻¹)	0.095	0.022	42.499	0.050	0.210	K-W	p > 0.05	-
	PT (mg l ⁻¹)	3.450	0.834	31.141	1.200	5.400	ANDEVA	0.046	fuera - dentro

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

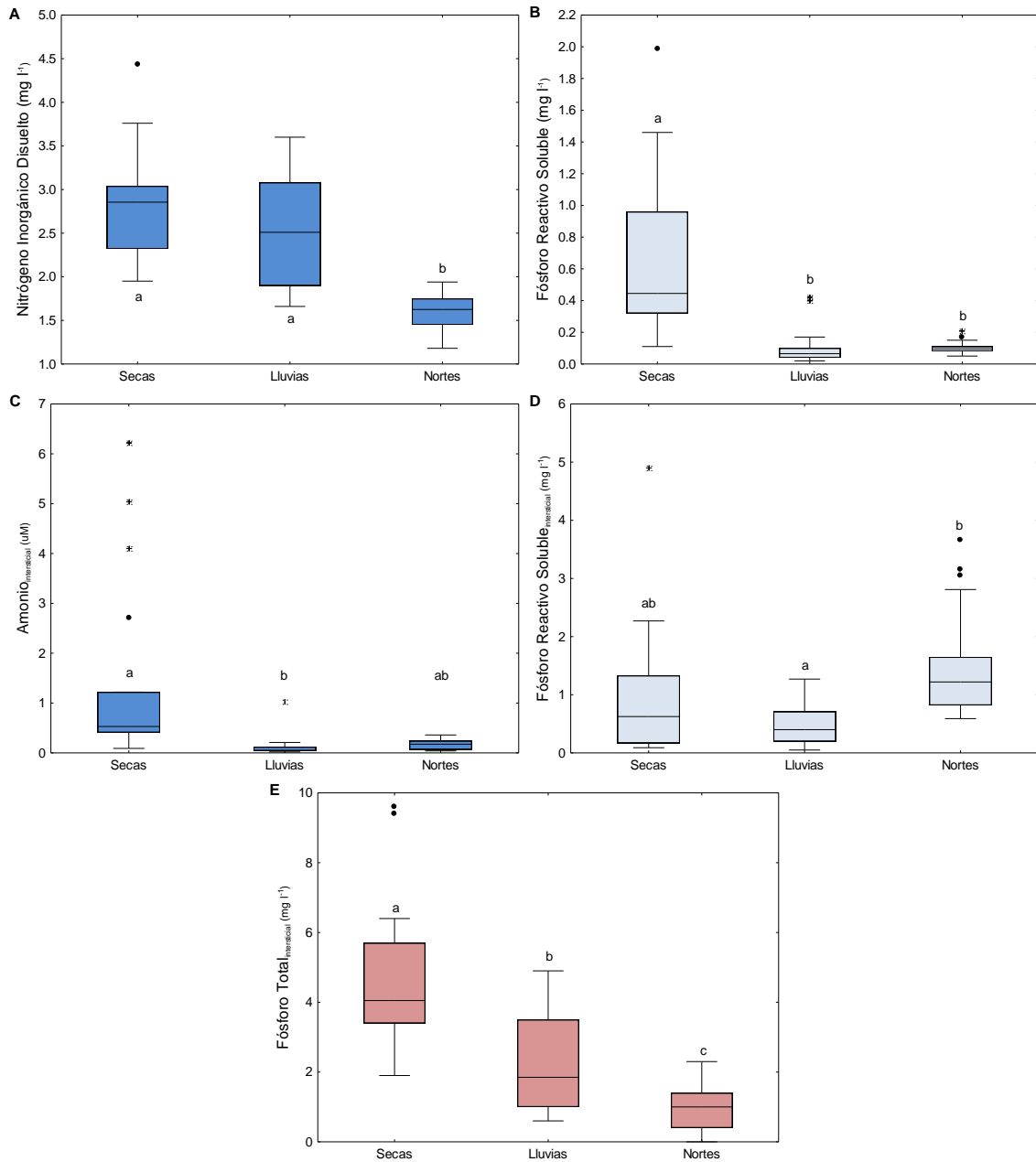
Tabla 6. Continuación

NH₄^{inter} (mg l⁻¹)	0.175	0.122	57.853	0.040	0.360	ANDEVA	0.015	fuera - dentro
FRS^{inter} (mg l⁻¹)	1.220	0.578	78.170	0.590	3.660	K-W	p > 0.05	-
PT^{inter} (mg l⁻¹)	1.000	0.704	70.451	0.000	2.300	ANDEVA	0.054	-

NID = nitrógeno inorgánico disuelto, FRS = fósforo reactivo soluble, NH₄= Amonio en agua intersticial, PT = fósforo total, K-W = Análisis de Kruskal-Wallis.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 7. Variación temporal de las distintas concentraciones de nutrientes en la zona de estudio. A. Concentración de nitrógeno inorgánico disuelto, B. Fósforo reactivo soluble, C. Concentración de amonio en agua intersticial D. Fósforo reactivo soluble intersticial y E. Concentración de fósforo total intersticial. Las letras minúsculas dentro de los diagramas de caja y bigote representan los grupos resultados de la prueba de ANDEVA ($\alpha = 0.05$) y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Las formas fosfatadas presentaron diferencias significativas entre temporadas, siendo las concentraciones de $FRS_{intersticial}$ las más altas durante la temporada de nortes, registrando una mediana de $1.22 \pm 0.58 \text{ mg l}^{-1}$, y las concentraciones más bajas se registraron durante la temporada de lluvias con una mediana de $0.40 \pm 0.36 \text{ mg l}^{-1}$ (Gráfica 7D), la temporada de secas no pudo ser separada como un grupo independiente con una concentración de $0.63 \pm 0.79 \text{ mg l}^{-1}$.

El fósforo total_{intersticial} fue variable a lo largo de las tres temporadas climáticas ($F_{(2,26)}=29.84$; $p = 0.000$) siendo la temporada de secas la de mayor concentración con $4.05 \pm 1.63 \text{ mg l}^{-1}$, seguida de lluvias con una mediana registrada de $1.85 \pm 1.78 \text{ mg l}^{-1}$ y con las concentraciones más bajas durante nortes (mediana = $1.00 \pm 0.70 \text{ mg l}^{-1}$). Esta variabilidad estuvo dada principalmente por el aporte del fósforo orgánico disuelto, el cual fue dominante durante las temporadas de secas y lluvias con un 85.57 y 77.89 % respectivamente. Sin embargo, esta dominancia cambió durante la temporada de nortes, donde aporta únicamente un 12% del $PT_{intersticial}$.

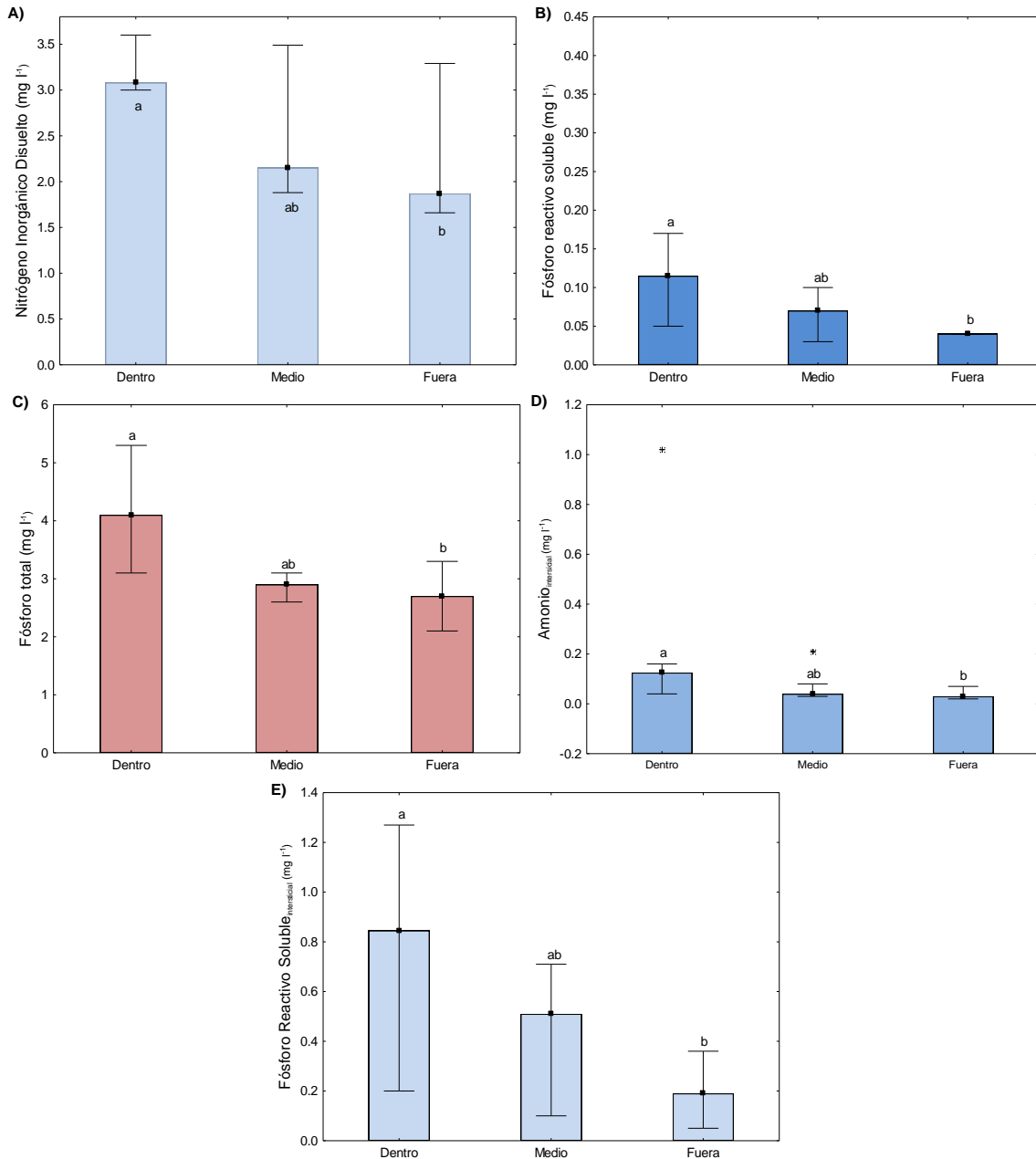
De manera espacial, las condiciones climáticas influyeron en las diferencias entre las estaciones cercanas a la costa, intermedias y alejadas de la costa, en donde los nutrientes en columna de agua fueron uniformes en toda la zona de estudio durante la temporada de secas (Gráfica 8).

Sin embargo durante lluvias y nortes se presentaron diferencias zonales de tal manera que en época de lluvias las estaciones más alejadas a la costa registraron la mayor concentración de NID con una mediana de $2.58 \pm 0.59 \text{ mg l}^{-1}$, esta zona fue la más estable de las tres con una mínima y una máxima de 2.05 y 3.76 mg l^{-1} respectivamente, mientras que las concentraciones más bajas se registraron en las estaciones cercanas a la línea de costa (Tabla 7). Estas estaciones fueron más variables con rangos que fueron superiores a las estaciones alejadas de la costa, donde se registró la máxima y la mínima de toda la zona de estudio (1.95 y 4.43 mg l^{-1} respectivamente).

El fósforo reactivo soluble al igual que las formas nitrogenadas, registró diferencias significativas, parecidas a las del nitrógeno inorgánico disuelto (Gráfica 8B), donde las mayores concentraciones se ubicaron en la zona más cercana a la costa con una mediana de $0.12 \pm 0.07 \text{ mg l}^{-1}$, las menores concentraciones se ubicaron en las estaciones más alejadas de la línea de costa con una mediana de $0.04 \pm 0.01 \text{ mg l}^{-1}$.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 8. Distribución espacial durante la temporada de lluvias de las distintas concentraciones de nutrientes en columna de agua y agua intersticial en las distintas zonas de clasificación. A) Nitrógeno inorgánico disuelto en columna de agua, B) FRS en columna de agua, C) PT en columna de agua, D) Amonio en agua intersticial y E) Fósforo total en agua intersticial. Letras en minúsculas significan los grupos resultantes después de las pruebas de comparaciones múltiples. ■ = Mediana y barras = rango sin casos extraordinarios (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

Dicho comportamiento también lo mostro el fósforo total cuyas máximas concentraciones se ubicaron en las estaciones cercanas a la costa (PT_{mediana} = 4.10 ± 1.22 mg l⁻¹) con una máxima de 5.3 mg l⁻¹ (Gráfica 8C). Dichas concentraciones disminuyen en la parte

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

intermedia y en la parte más lejana a la costa, donde registraron las mínimas concentraciones con un valor de 0.6 mg l^{-1} (Tabla 7). Con base en la Gráfica 8 se denotó la importancia de los aportes de agua dulce como fuente de fósforo reactivo soluble ya que, durante la temporada de lluvias, aunque la salinidad fue clasificada como metahalina, las mayores concentraciones se ubicaron en las estaciones de menor salinidad mientras que a mayor salinidad menor concentración de FRS.

Dicho comportamiento fue distinto al que presentó el FOD, que en todas las zonas fue la forma dominante y cuyo aporte va aumentando conforme disminuyen las concentraciones de PT, de manera que en las zonas más cercanas a la costa tuvieron un 75% del PT, mientras que en las estaciones más alejadas dicho aporte aumentó hasta un 98%.

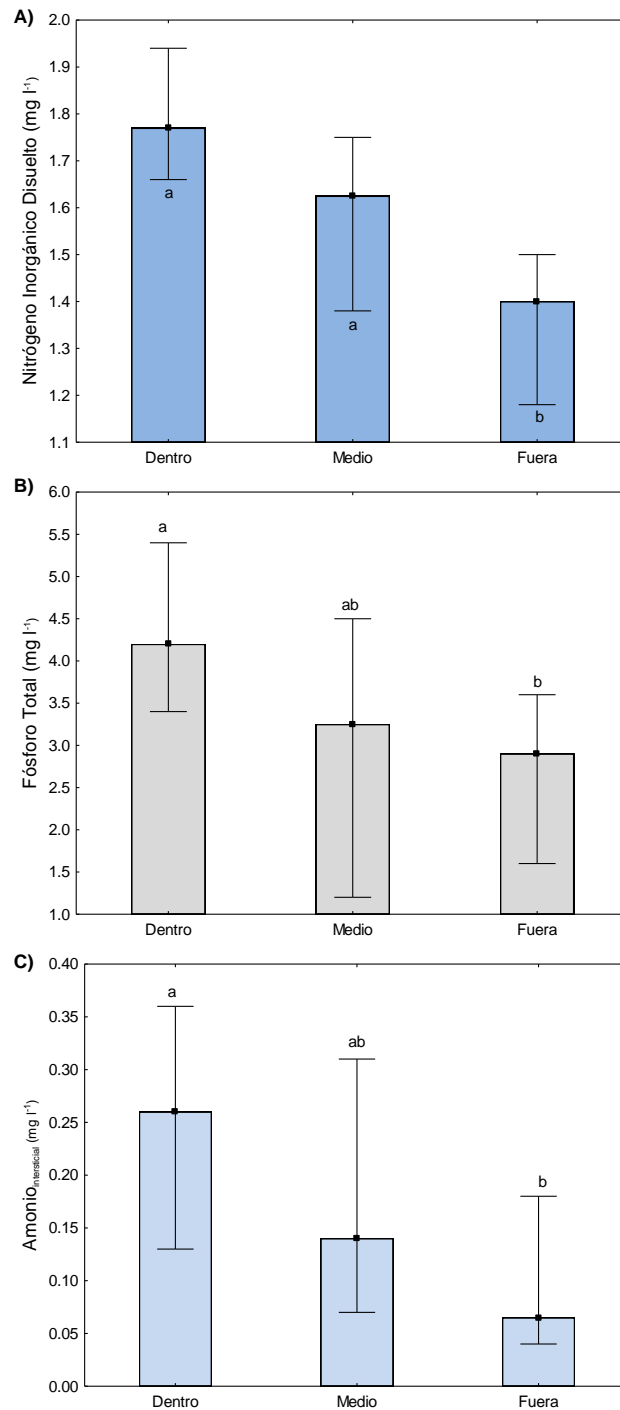
Las concentraciones de nutrientes en agua intersticial (amonio y $\text{FRS}_{\text{inter}}$) al igual que las presentes en columna de agua, presentaron diferencias significativas conforme se alejan de la costa. Las concentraciones de amonio intersticial siguen un patrón inverso a la distancia hacia la costa, con una mediana en las estaciones cercanas a la costa de $0.13 \pm 0.05 \text{ mg l}^{-1}$, mientras que, en las estaciones más alejadas a la costa, este nutriente disminuye significativamente con una mediana de $0.03 \pm 0.02 \text{ mg l}^{-1}$ registrando valores mínimos de 0.02 mg l^{-1} (Gráfica 8D).

El $\text{FRS}_{\text{inter}}$ de igual manera disminuyó conforme aumentó la profundidad (Gráfica 8E), lo cual es un reflejo de la distancia hacia la línea de costa, por lo que en las estaciones más someras la concentración fue de $0.85 \pm 0.26 \text{ mg l}^{-1}$ y una máxima de 1.27 mg l^{-1} mientras que en las estaciones más profundas dicha concentración se redujo hasta una concentración de $0.19 \pm 0.14 \text{ mg l}^{-1}$ con una mínima de 0.05 mg l^{-1} (Tabla 7).

Durante la temporada de nortes hubo una mayor homogeneidad en las concentraciones de nutrientes, ya que solamente el NID, PT en columna de agua y el amonio en agua intersticial presentaron diferencias significativas (Tabla 6) con tendencias inversas a la profundidad (Gráfica 8), por lo que las mayores concentraciones se ubicaron en las estaciones cercanas a la costa mientras que las de menor concentración se localizaron en las estaciones lejanas a la costa (Tabla 7).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 9. Variación espacial de las concentraciones de nutrientes en columna de agua e intersticial durante la temporada de nortes en la zona de estudio. A) Amonio en columna de agua, B) Fósforo Reactivo Soluble en columna de agua, C) Fósforo Total en columna, D) Amonio en agua intersticial y E) Fósforo Reactivo Soluble en agua intersticial. Las letras en minúsculas corresponden a los distintos grupos resultado de la prueba de comparaciones múltiples, ■ = mediana y las barras corresponden al rango sin valores extraordinarios (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 7. Estadística descriptiva de las concentraciones de nutrientes en las zonas muestreadas durante las distintas épocas climáticas en la Reserva de la Biósfera de Los Petenes.

	Nutriente	Secas				Lluvias				Nortes			
		Mediana	Pseudo σ	Min	Max	Mediana	Pseudo σ	Min	Max	Mediana	Pseudo σ	Min	Max
Cercana a costa	NID (mg l⁻¹)	2.705	0.500	1.950	4.430	3.080	0.178	2.390	3.600	1.770	0.074	1.660	1.940
	FRS (mg l⁻¹)	0.420	0.109	0.140	0.960	0.115	0.069	0.050	0.420	0.130	0.052	0.080	0.210
	PT (mg l⁻¹)	3.400	0.259	1.400	5.200	4.100	1.223	3.100	5.300	4.200	0.890	3.400	5.400
	NH₄inter (mg l⁻¹)	1.020	2.220	0.190	6.220	0.125	0.052	0.040	1.020	0.260	0.074	0.130	0.360
	FRSinter (mg l⁻¹)	1.340	1.016	0.120	4.900	0.845	0.263	0.200	1.270	1.595	0.975	0.590	3.060
	PTinter (mg l⁻¹)	4.350	3.206	3.600	9.600	3.850	1.742	0.900	4.900	1.650	0.834	0.400	2.300
Intermedia	NID (mg l⁻¹)	3.010	0.106	2.030	3.070	2.150	0.610	1.880	3.490	1.625	0.130	1.380	1.750
	FRS (mg l⁻¹)	0.670	0.497	0.270	1.350	0.070	0.022	0.030	0.400	0.100	0.017	0.060	0.120
	PT (mg l⁻¹)	2.200	1.149	1.000	4.500	2.900	0.352	0.500	4.200	3.250	0.778	1.200	4.500
	NH₄inter (mg l⁻¹)	0.475	0.093	0.090	5.040	0.040	0.022	0.030	0.210	0.140	0.095	0.070	0.310

INFORME FINAL

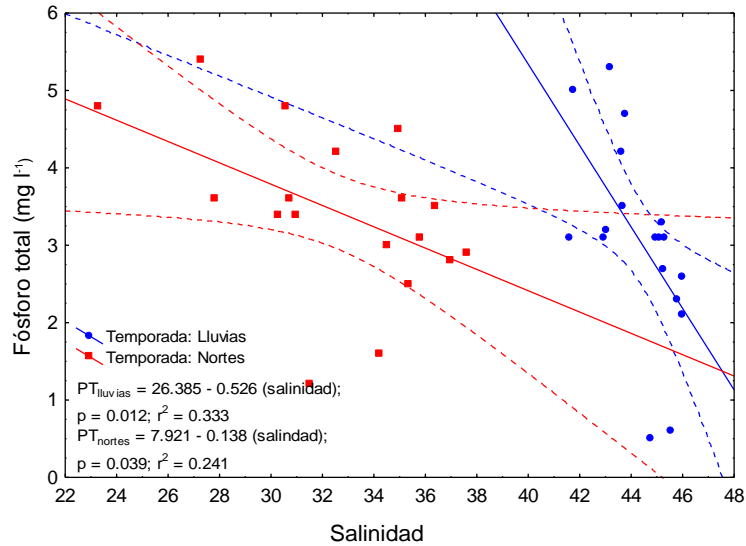
FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 7. Continuación

	FRS_{inter} (mg l⁻¹)	0.355	0.406	0.110	1.710	0.510	0.204	0.100	0.710	1.220	0.324	0.730	3.660
	PT_{inter} (mg l⁻¹)	3.350	1.964	1.900	6.400	1.600	0.871	0.600	3.800	0.900	0.537	0.200	1.500
	NID (mg l⁻¹)	2.580	0.586	2.050	3.760	1.870	0.489	1.660	3.290	1.400	0.135	1.180	1.500
	FRS (mg l⁻¹)	0.495	0.654	0.110	1.990	0.040	0.000	0.020	0.050	0.080	0.020	0.050	0.100
	PT (mg l⁻¹)	1.550	0.519	1.100	4.700	2.700	0.704	0.600	3.300	2.900	0.593	1.600	3.600
Alejadas a costa	NH₄_{inter} (mg l⁻¹)	0.540	0.348	0.300	2.710	0.030	0.026	0.020	0.070	0.065	0.069	0.040	0.180
	FRS_{inter} (mg l⁻¹)	0.420	0.445	0.090	1.330	0.190	0.139	0.050	0.360	0.910	0.500	0.670	3.150
	PT_{inter} (mg l⁻¹)	4.700	1.427	3.000	6.200	1.050	1.186	0.700	3.500	0.400	0.537	0.000	1.300

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 10. Concentraciones de fósforo total a lo largo del gradiente de salinidad presentes durante las temporadas de lluvias y nortes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

En el caso del nitrógeno inorgánico disuelto las mayores concentraciones registradas fueron de $1.78 \pm 0.07 \text{ mg l}^{-1}$ con una máxima de 1.94 mg l^{-1} (Gráfica 9A); la mínima registrada se localizó en las zonas más profundas del área de estudio con 1.18 mg l^{-1} .

Durante esta temporada se registró un rango de salinidad más amplio y el comportamiento del PT fue el mismo al que se presentó durante la temporada de lluvias donde las mayores concentraciones se ubicaron en las estaciones polihalinas (5.40 mg l^{-1} ; Gráfica 11) mientras que las menores concentraciones se ubicaron en las estaciones de mayor salinidad con un mínimo de 1.20 mg l^{-1} . Dicho comportamiento se vio reflejado de igual manera entre las distintas zonas, donde las estaciones cercanas a la costa fueron las de mayor concentración mientras que las más alejadas fueron las de menor concentración (Gráfica 10 B).

Las concentraciones de amonio intersticial mostraron una disminución con el aumento de la profundidad y alejamiento de la costa de tal manera que las concentraciones más altas registradas fueron de $0.26 \pm 0.07 \text{ mg l}^{-1}$ mientras que las mínimas registradas fueron en las estaciones alejadas de la costa con $0.07 \pm 0.06 \text{ mg l}^{-1}$.

IV.1.3 Carbono orgánico

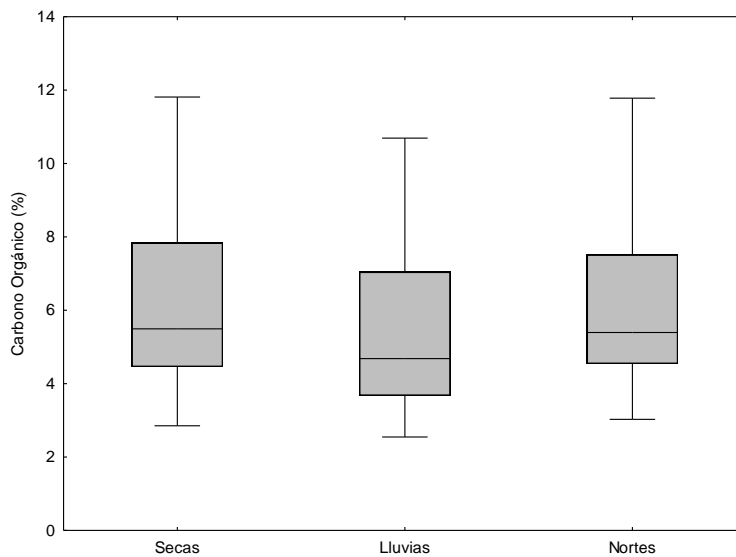
De manera general en la Reserva de los Petenes, la concentración de carbono orgánico (C.O.) fue homogénea a lo largo de los distintos muestreos y temporadas climáticas (secas, lluvias y nortes; $F_{(2,51)} = 0.72$; $p = 0.49$) con promedios de 6.45, 5.47 y 6.16 %

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

respectivamente (Tabla 8) con una máxima registrada de 11.81% durante la temporada de secas y un porcentaje mínimo de 2.55% durante lluvias (Gráfica 11).

De manera espacial, la concentración de C.O. tuvo diferencias significativas a lo largo de los distintos transectos dentro de la zona de estudio (Tabla 9), siendo el transecto B el de mayor porcentaje de C.O. con un promedio de $7.37 \pm 2.95\%$, mientras que el transecto E tuvo la concentración de C.O. más baja con una media de $4.14 \pm 1.23\%$ (Gráfica 11).



Gráfica 11. Variación temporal del porcentaje de carbono orgánico durante secas, lluvias y nortes en la Reserva de los Petenes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

De igual manera se denotó una tendencia inversa en la concentración de carbono orgánico, con respecto a la profundidad del sistema en la zona de estudio de tal manera que para todas las temporadas climáticas, las estaciones cercanas a la costa presentaron los porcentajes más altos de carbono orgánico del sistema con una media de $8.23 \pm 2.09\%$ cuya máxima fue localizada en la estación B1 con 11.81%, seguida de una zona de transición (estaciones medias) sin poderse separar, mientras que la zona más alejada fue la de menor porcentaje con una media $4.19 \pm 0.80\%$ (Mapa 2), con una mínima para todo el sistema de 2.56%.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

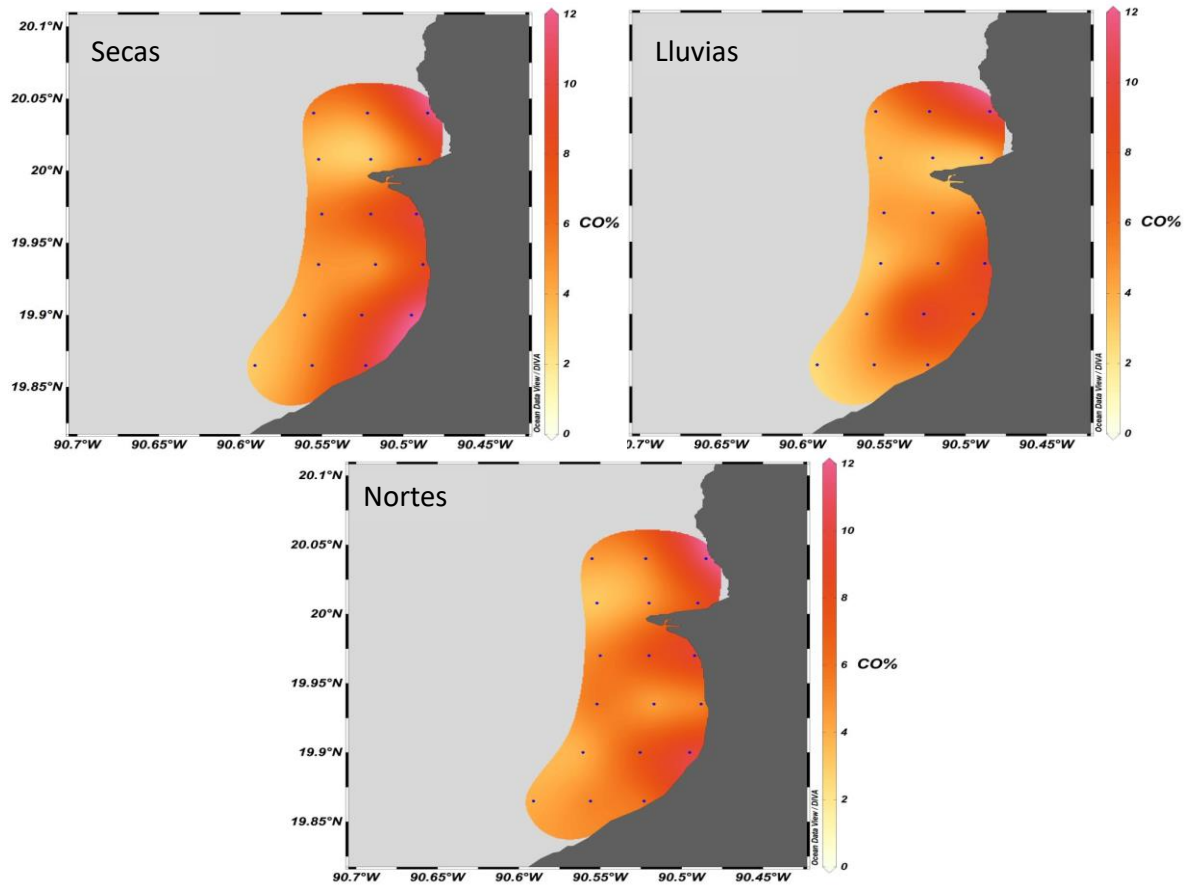
Tabla 8. Porcentaje de carbono orgánico en la Reserva de los Petenes durante las diferentes temporadas climáticas.

Estación	CO %						
	Secas	Lluvias	Nortes	\bar{x}	s	Min	Max
A1	9.660	5.350	5.880	6.963	2.350	5.350	9.660
A2	5.310	4.610	5.320	5.080	0.407	4.610	5.320
A3	3.110	2.550	3.970	3.210	0.715	2.550	3.970
B1	11.810	7.580	10.220	9.870	2.137	7.580	11.810
B2	7.580	9.290	7.510	8.127	1.008	7.510	9.290
B3	4.330	4.300	3.750	4.127	0.327	3.750	4.330
C1	7.840	9.090	4.920	7.283	2.140	4.920	9.090
C2	4.460	5.330	4.130	4.640	0.620	4.130	5.330
C3	4.650	3.240	5.780	4.557	1.273	3.240	5.780
D1	9.970	5.480	9.700	8.383	2.518	5.480	9.970
D2	7.600	4.760	7.660	6.673	1.657	4.760	7.660
D3	5.680	4.550	5.470	5.233	0.601	4.550	5.680
E1	6.180	3.240	7.260	5.560	2.080	3.240	7.260
E2	2.850	3.210	4.610	3.557	0.930	2.850	4.610
E3	3.230	3.680	3.030	3.313	0.333	3.030	3.680
F1	11.430	10.690	11.780	11.300	0.557	10.690	11.780
F2	5.270	7.040	5.320	5.877	1.008	5.270	7.040
F3	5.070	4.400	4.540	4.670	0.353	4.400	5.070
\bar{x}	6.446	5.466	6.158				
S	2.789	2.342	2.414				
Min	2.850	2.550	3.030				
Max	11.810	10.690	11.780				

\bar{x} = Media, s = desviación estándar.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Mapa 2. Distribución espacial del porcentaje de carbono orgánico en la Reserva de los Petenes durante las diferentes épocas climáticas del 2015 (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

Estos valores coinciden con lo reportado por otros autores para praderas de *T. testudinum* como es el caso de lo expuesto por Burgos-León *et al.* (2013), los cuales registraron valores de 2.50 a 3.30%, mientras que Valdéz Cruz (2016) quien para la Reserva de Petenes determinó un porcentaje de 7.33% para estaciones cercanas a la costa y 3.10% para estaciones más profundas y alejadas de la costa.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 9. Resultado de los análisis ANDEVA ($\alpha = 0.05$) para determinar la variación espacio-temporal del porcentaje de carbono en la Reserva de Los Petenes.

	Temporada climática	Transecto	Cercanía a la costa
Tipo de Prueba	Paramétrica	Paramétrica	Paramétrica
g.l.	2	5	2
n	51	51	51
Valor de F	0.716	2.925	20.975
Valor de P	0.494	0.022	0.000
Grupo distinto	-	B diferente de E	Cercanos a la costa

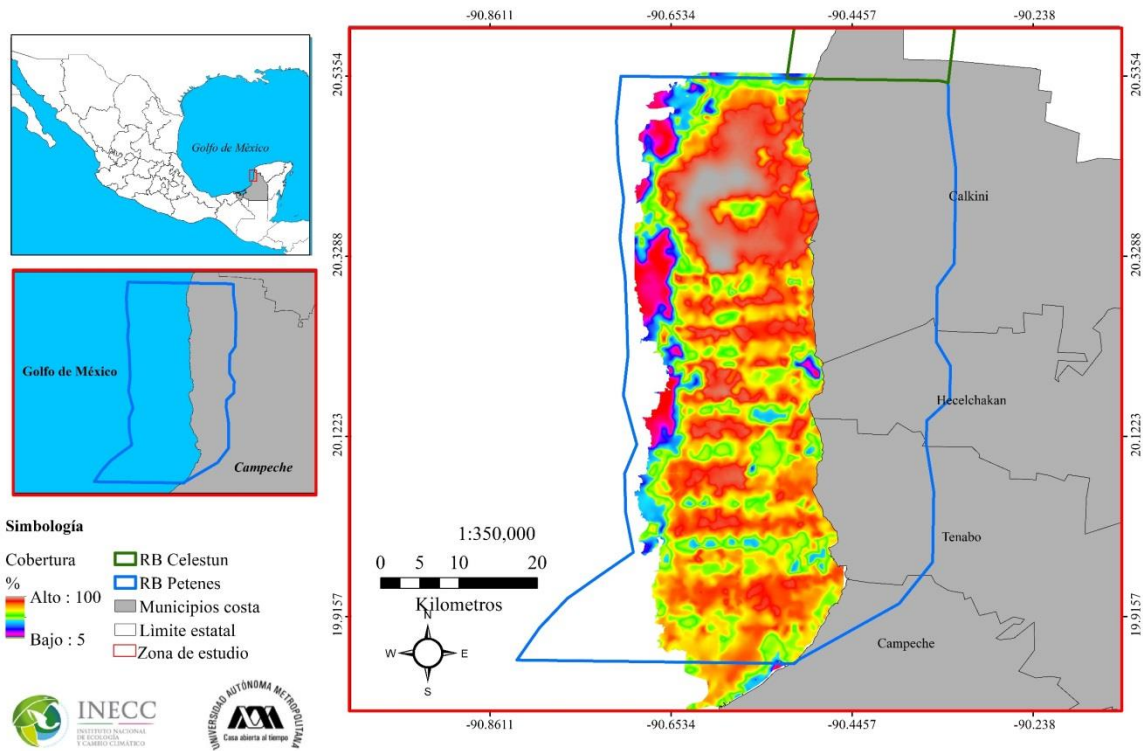
g.l. = grados de libertad, n = número de muestras para el análisis

IV.1.4 Vegetación Acuática Sumergida

La extensión que ocupan los pastos marinos de la RBLP es de 1,284.68 km² que representa el 56% del total registrado para las costas del Golfo de México. Este dato también nos indica que en la RBLP se desarrolla la mayor extensión de pastos marinos registrada en nuestro país (Mapa 3). Las especies presentes de pastos marinos son *T. testudinum*, *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii* y *Halophila decipiens*. La especie dominante en la zona de estudio es *T. testudinum* la cual forma diversas asociaciones florísticas con las otras especies de pastos y con macroalgas, de las cuales destaca *Caulerpa paspaloides* así como *Caulerpa prolifera*, *Caulerpa taxifolia*, *Penicillium sp.*, *Abravillea sp.*, *Halimeda sp.* estas se encuentran presentes en distintas proporciones las cuales fueron agrupadas con el nombre genérico de macroalgas (Figura 8).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Mapa 3. Valores de porcentaje de cobertura de VAS en la reserva de la biosfera los Petenes, Campeche calculados mediante el uso de la ecosonda hidroacústica Biosonics (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

Se determinaron diferencias significativas entre temporadas en la biomasa total de *T. testudinum* ($F_{(2,51)} = 11.41$; $p = 0.000$), donde nortes presentó la menor concentración de biomasa ($\bar{X}_{\text{biomasa total}} = 776.17 \pm 443.82 \text{ g m}^{-2}$ con una mínima registrada de 202.22 g m^{-2}), con relación a la temporada de secas y lluvias en donde los valores de biomasa fueron $1,573.03 \pm 415.35$ y $1,353.92 \pm 657.45 \text{ g m}^{-2}$ respectivamente, alcanzando un valor máximo de $2,713.33 \text{ g m}^{-2}$ durante la temporada de lluvias (Gráfica 12A). De igual manera la temporada de nortes fue la de mayor variación con un coeficiente $\text{CV}\% = 75.08\%$, mientras que la temporada con menor variación fue en secas con un coeficiente de variación de 25.04% (Tabla 10).

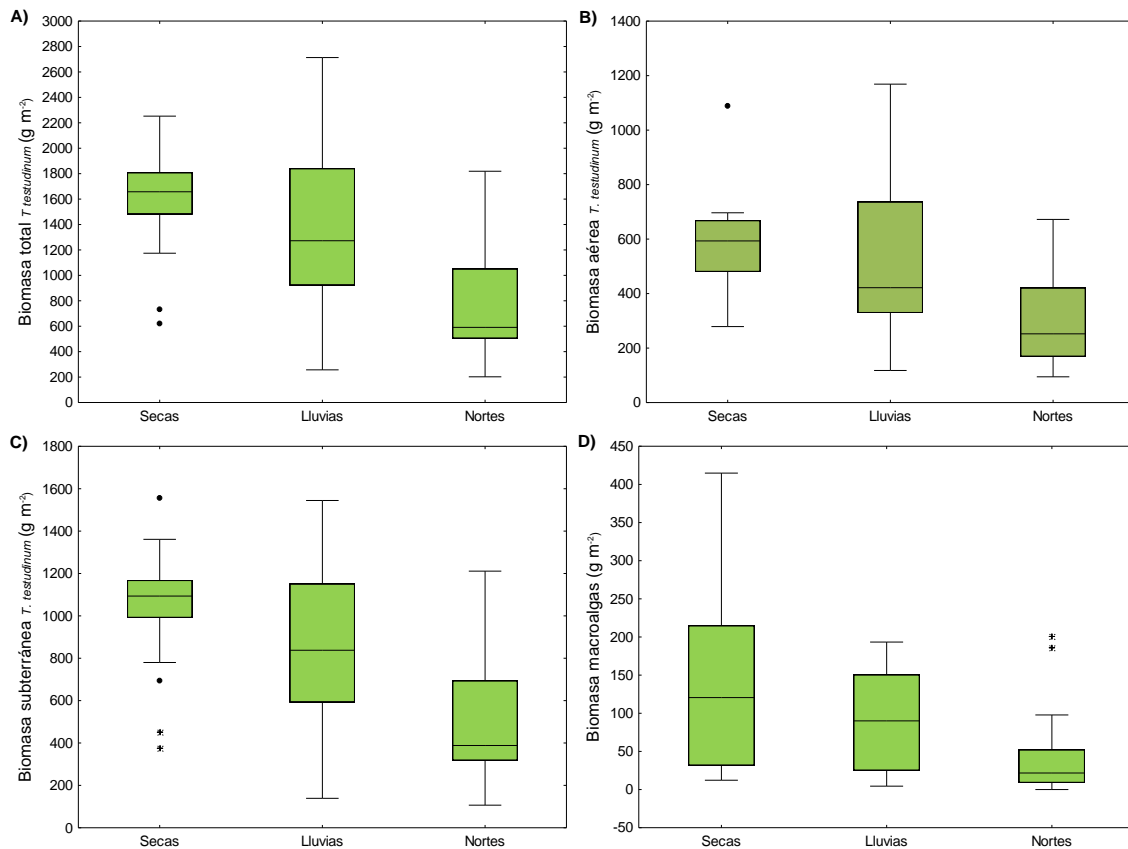
Con respecto a la biomasa aérea, se encontraron diferencias significativas entre las temporadas de nortes y secas, encontrándose que la menor biomasa fue en nortes con un promedio de $46.61 \pm 60.93 \text{ g m}^{-2}$, y en secas fue mayor con una media de $130.53 \pm 133.91 \text{ g m}^{-2}$. A pesar de estas diferencias, el aporte de la biomasa aérea representó el mismo porcentaje sobre la biomasa total con valores de 37.81% , 37.85% y 40% para secas, lluvias y nortes respectivamente.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Para el caso de la biomasa subterránea, la temporada de nortes fue la temporada estadísticamente diferente (Tabla 10) con los menores valores de biomasa promedio ($\bar{X}_{\text{biomasa subterránea}} = 482.59 \pm 277.25 \text{ g m}^{-2}$); las temporadas de secas y lluvias no mostraron diferencias y la biomasa promedio más alta fue en la temporada de secas (Gráfica 12C) con un promedio de $1,035.25 \pm 299.17 \text{ g m}^{-2}$. Esta biomasa representó hasta un 62% de la biomasa total de *T. testudinum* (Tabla 10).

La temporada de nortes de igual manera registró las menores concentraciones de biomasa de macroalgas con una media de $46.61 \pm 60.93 \text{ g m}^{-2}$ ($F_{(2,35)} = 4.08$; $p = 0.02$, Gráfica 12 D), la máxima concentración se registró durante la temporada de secas con una biomasa promedio de $130.53 \pm 133.91 \text{ g m}^{-2}$.



Gráfica 12. Variación temporal de los valores de biomasa de *T. testudinum* y macroalgas en la RBLP. A) biomasa total de *T. testudinum*, B) biomasa aérea de *T. testudinum*, C) biomasa subterránea de *T. testudinum* y D) biomasa de macroalgas. ● = valores extraordinarios y * = valores extremos (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

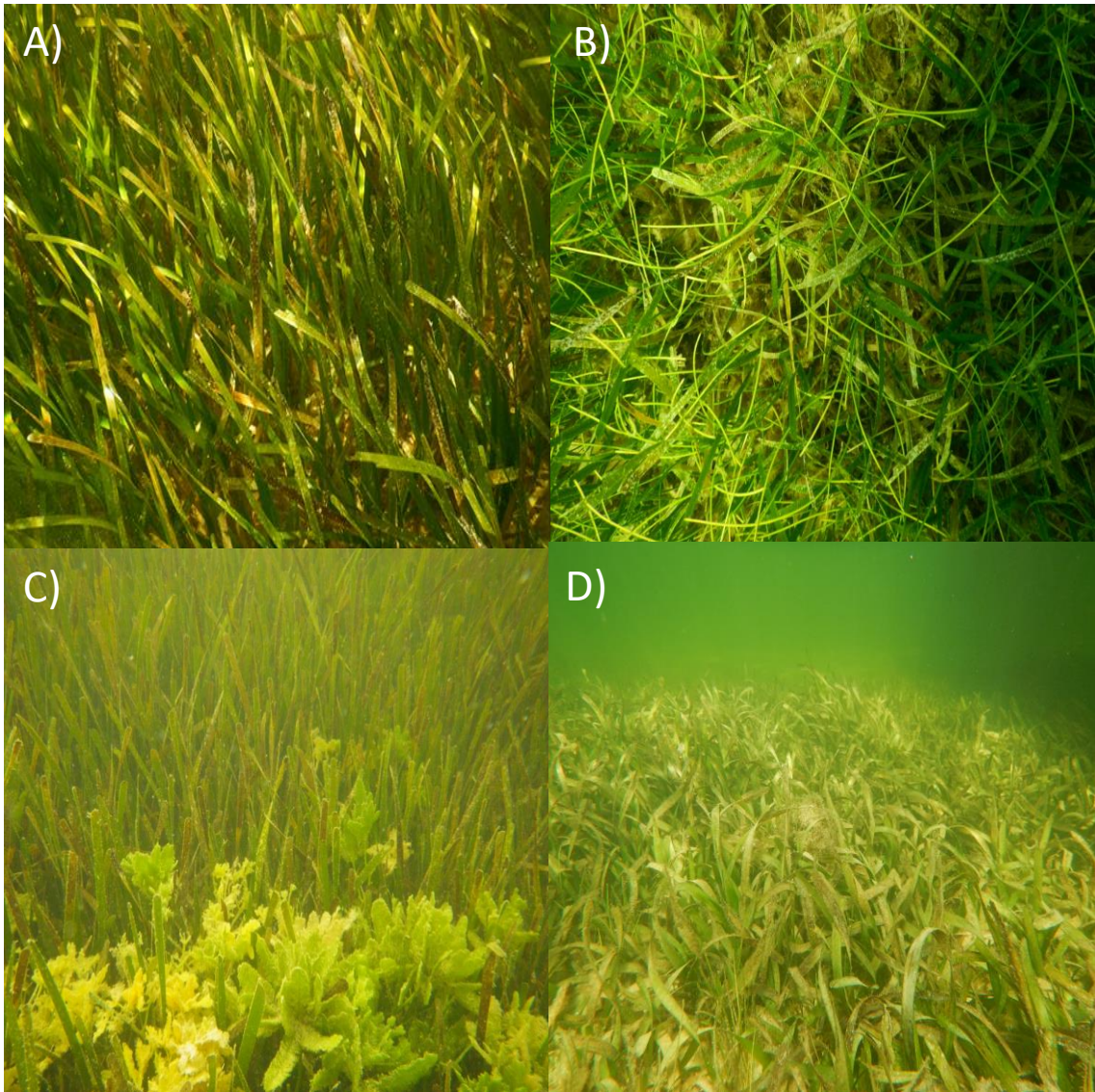


Figura 8. Asociaciones de VAS ubicadas dentro de la RBLP. A) Parche monoespecífico de *T. testudinum*, B) asociación de *T. testudinum* y *S. filiforme*, C) asociación de *T. testudinum* y macroalgas y D) asociación de *T. testudinum* y *H. wrightii* (fotos tomadas por personal del laboratorio de pastos marinos, 2015).

Cabe mencionar que para la época de nortes se registraron biomásas de las otras especies de pastos marinos (*Syringodium filiforme* y *Halodule wrightii*), sin embargo, su presencia solo fue de manera puntual en las estaciones A3 (biomasa_{*S. filiforme*} = 90.00 g m⁻²) y F3 (biomasa_{*H. wrightii*} = 18.88 g m⁻²).

Con base en los análisis de regresión lineal, la biomasa aérea de *T. testudinum* estuvo relacionada de manera directamente proporcional a la biomasa subterránea (Gráfica 13), sin embargo este acoplamiento entre el crecimiento vertical y horizontal de *T. testudinum* varió entre temporadas de tal manera que durante secas el modelo de regresión fue el

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

que menos explicó la variación de los datos con un 49.6 %, de igual manera durante esta temporada se presentó la menor producción de biomasa aérea con relación a la biomasa subterránea ($m = 0.56$). La temporada que tuvo mayor dependencia de la biomasa aérea con la subterránea fue durante lluvias con una pendiente de 0.80, siendo el modelo con un mayor ajuste al comportamiento de los datos con un 73% (Gráfica 12 B).

De manera espacial la biomasa total de *T. testudinum* presentó la misma tendencia inversa con relación a la profundidad durante todas las épocas climáticas, sin embargo, cada temporada presentó distribuciones espaciales particulares en secas, lluvias y nortes respectivamente.

Durante la temporada de secas la mayor biomasa de *T. testudinum* se colectó en la estación B1 con 2,252.22 g m⁻² mientras que la menor fue la estación A3 con 620.00 g m⁻² (Mapa 4A).

Esta tendencia negativa durante la temporada de lluvias se mantuvo en casi toda la zona de estudio, exceptuando el transecto D (cercano a Río Verde) el cual mantiene estable sus concentraciones con respecto a secas y un aumento en la profundidad (Mapa 4B). La estación F1 nuevamente se mantiene estable inclusive aumentando su biomasa de 1,728.89 a 2,240.48 g m⁻².

Durante la época de nortes como ya se mencionó anteriormente hay una disminución general de la biomasa total de *T. testudinum* en la zona de estudio y los mayores valores se produjeron en las estaciones cercanas a la costa, pero sus valores disminuyen conforme aumenta la profundidad (Mapa 4C). No obstante, esta disminución general, las estaciones D1 (la más cercana a Río Verde) y F1 son las que registraron la mayor biomasa con 1,472.22 y 1,818.89 g m⁻² respectivamente.

La vegetación asociada a la VAS como son las macroalgas de igual manera presentaron patrones de distribución distintos en las tres estaciones climáticas (Mapa 4) produjeron en las estaciones A3 (211.11 g m⁻²), E3 (218 g m⁻²) las cuales correspondieron con las biomásas más bajas de *T. testudinum* y la estación F3 con la máxima registrada para secas (414.77 g m⁻²), esta última estación corresponde con altos valores de biomasa de *T. testudinum*.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

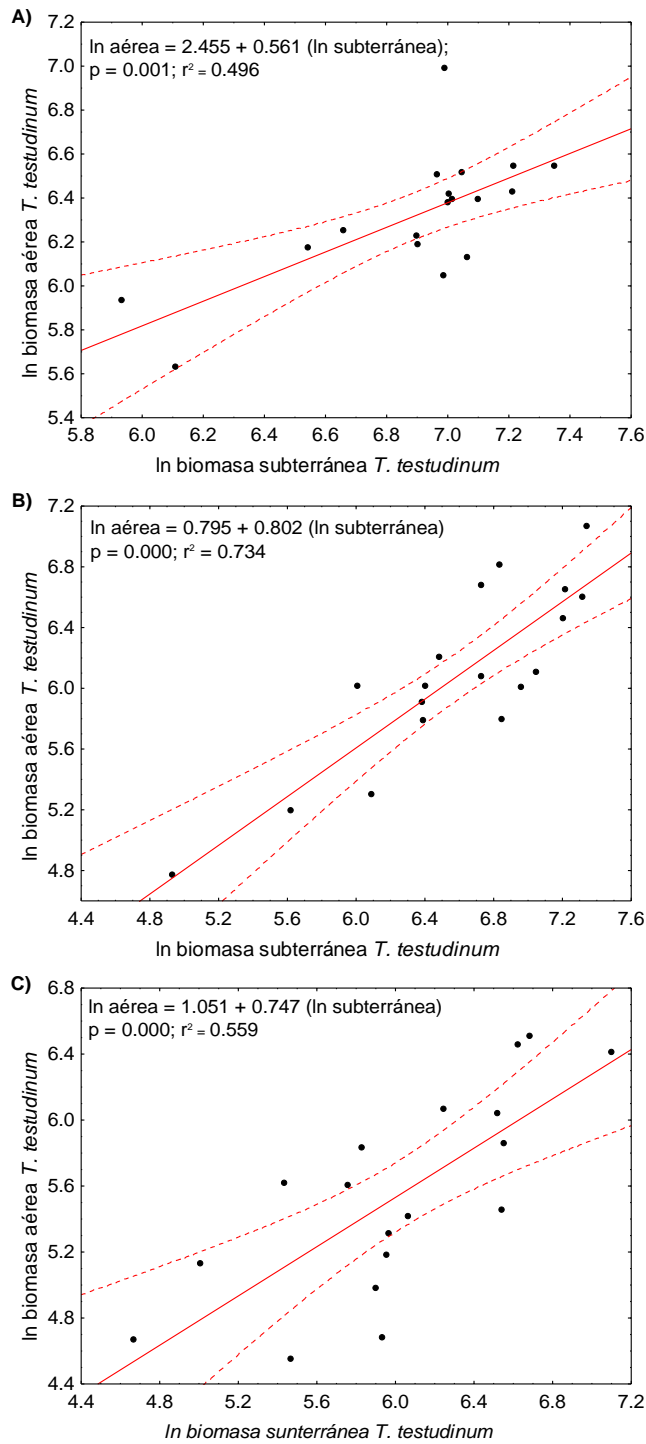
Tabla 10. Estadística descriptiva de la biomasa de la VAS durante 2015 en la Resera de Los Petenes.

Epoca	Especie	Media gr m ⁻²	Desv. Est.	CV%	Min gr m ⁻²	Max gr m ⁻²
Secas	Biomasa aérea <i>T. testudinum</i>	576.173	172.106	29.007	278.889	1087.778
	Biomasa subterránea <i>T. testudinum</i>	1035.247	299.173	27.363	377.778	1556.667
	Biomasa total <i>T. testudinum</i>	1573.025	415.348	25.054	620.000	2252.222
	Biomasa macroalgas	130.527	133.907	133.907	12.220	414.770
	Biomasa aérea <i>T. testudinum</i>	507.469	276.111	65.481	117.778	1168.889
Lluvias	Biomasa subterránea <i>T. testudinum</i>	846.446	419.866	50.117	138.889	1544.444
	Biomasa total <i>T. testudinum</i>	1353.915	657.450	51.677	256.667	2713.333
	Biomasa macroalgas	94.167	67.658	75.175	4.444	193.333
	Biomasa aérea <i>T. testudinum</i>	303.827	184.168	73.018	94.444	672.222
Nortes	Biomasa subterránea <i>T. testudinum</i>	482.593	277.251	71.395	106.667	1211.111
	Biomasa total <i>T. testudinum</i>	776.173	443.822	75.083	202.222	1818.889
	Biomasa macroalgas	46.605	60.928	281.205	0.000	201.111

Desv. Est. = Desviación estándar, CV% = Coeficiente de variación

INFORME FINAL

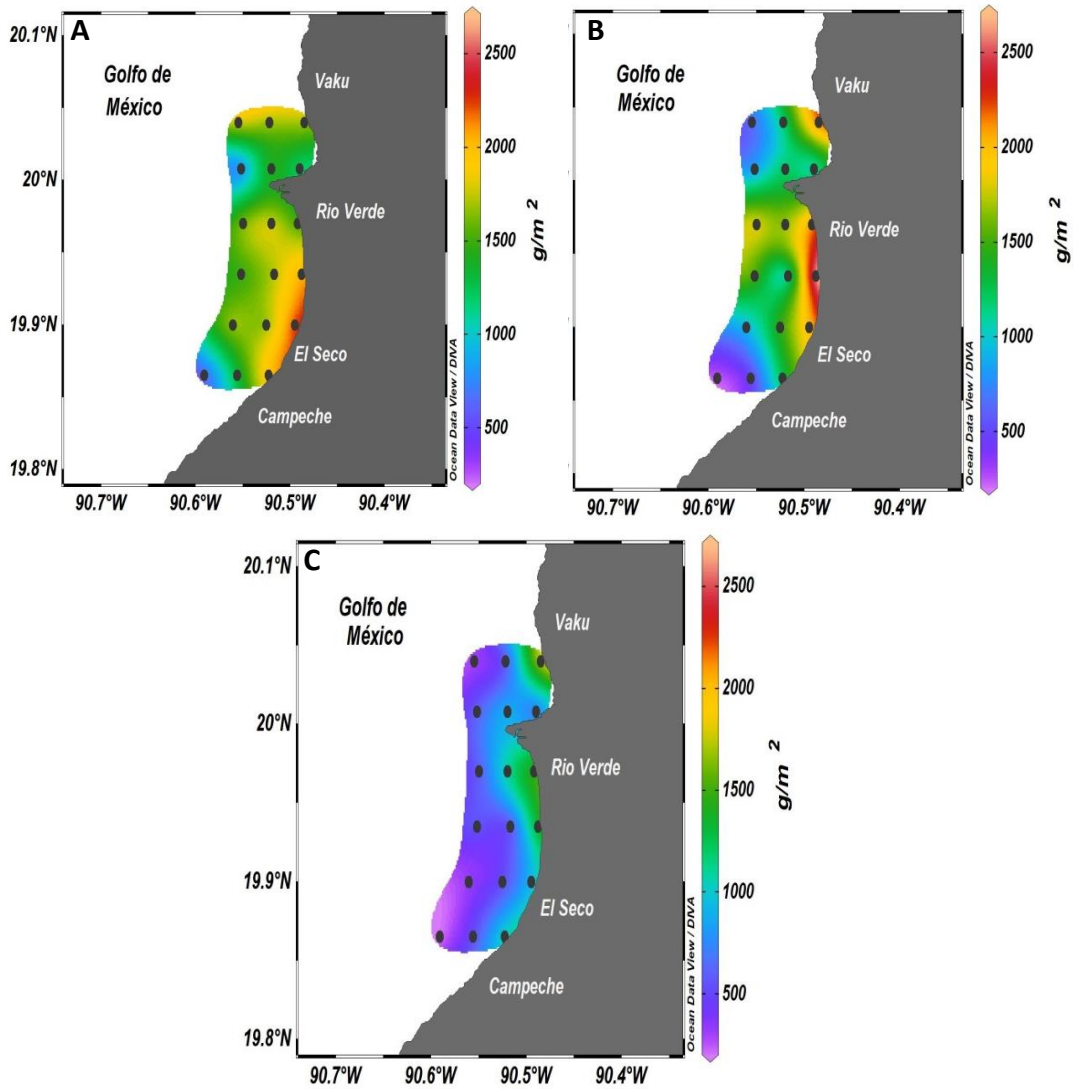
FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 13. Relación de logaritmo natural (ln) de la biomasa aérea con (ln) biomasa subterránea para *T. testudinum*, durante la temporada de A) Secas, B) Lluvias y C) Nortes, en el año 2015 (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

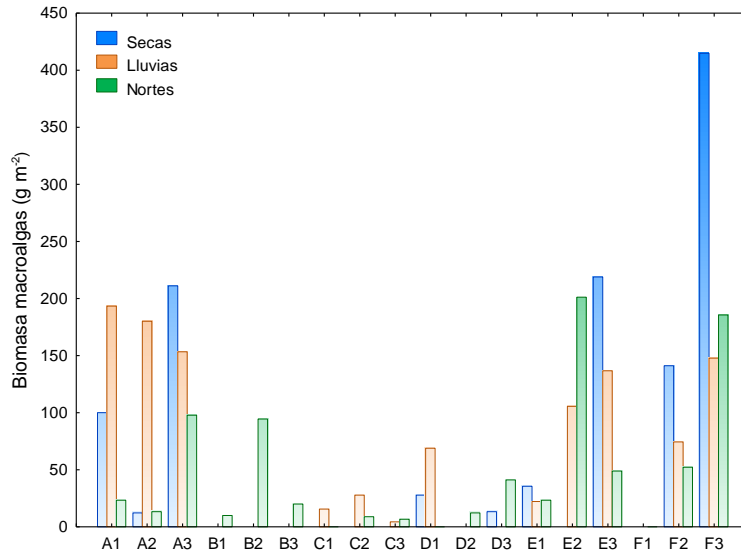


Mapa 4. Variación espacial de biomasa total de *T. testudinum* en la reserva de los Petenes durante distintas temporadas. A) secas, B) lluvias y C) nortes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

En nortes el número de estaciones con presencia de macroalgas aumentó con relación a la de lluvias alcanzando un total de 15 estaciones distribuidas en toda la zona de estudio, exceptuando la estación F1 en la cual no se registró ningún tipo de macroalgas en ninguna de las épocas de muestreo (Mapa 4). Las estaciones E2 y F3 presentaron las mayores biomásas de macroalgas con 201.11 y 185.56 $g\ m^{-2}$ respectivamente.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

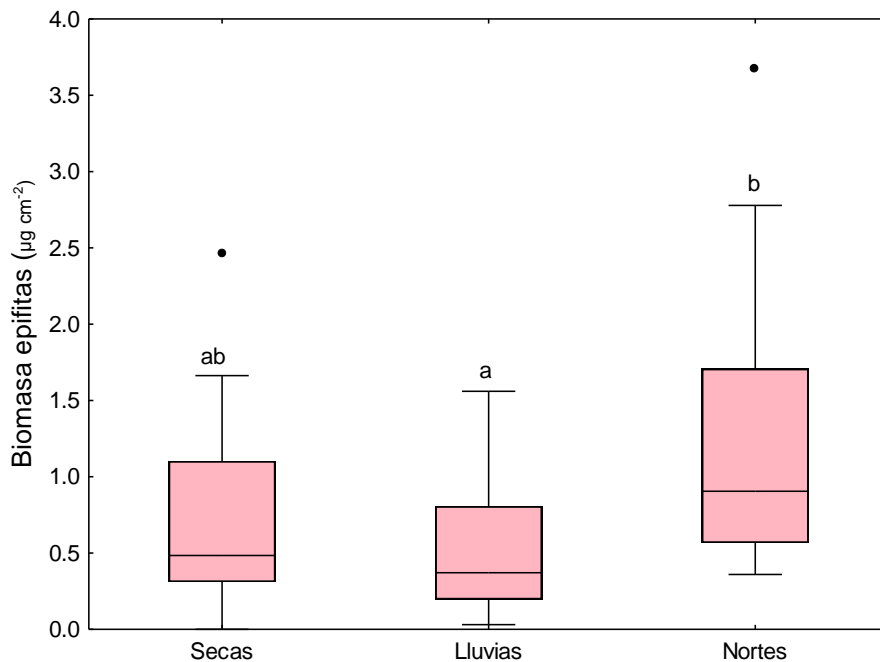


Gráfica 14. Variación espacial de la biomasa de macroalgas durante las tres épocas climáticas (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

Durante la época de lluvias la biomasa de macroalgas, aunque disminuyó de manera general en la zona de estudio, colonizó nuevos sitios por que las estaciones con presencia de macroalgas aumentaron de 9 a 11 (Gráfica 14). Cabe mencionar que el transecto A (zona cercana a la ciudad de Campeche) registró un aumento de la biomasa de algas en la estación más somera con la máxima concentración de 193.33 g m^{-2} y la intermedia de 180.00 g m^{-2} .

IV.1.5 Epífitas

La concentración de biomasa epífita medida como clorofila *a* por unidad de área de las hojas de *T. testudinum* presentó diferencias significativas de manera temporal ($p < 0.01$) de tal manera durante nortes se registró la mayor concentración con una media de $1.237 \pm 0.888 \mu\text{g cm}^{-2}$ mientras que la menor biomasa fue en lluvias con un valor promedio de $0.556 \pm 0.489 \mu\text{g cm}^{-2}$; Gráfica 15.



Gráfica 15. Variación temporal de la biomasa de epífitas durante el 2015 en la Reserva de los Petenes. Las letras representan los distintos grupos resultado de las comparaciones múltiples de la prueba ANDEVA (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos). a = grupo 1 con diferencias significativas, b = grupo 2 con diferencias significativas y ab= grupo sin diferencias significativas

La biomasa epífita mostró ser uniforme no importando el gradiente de profundidad, así como tampoco mostró algún comportamiento en sentido de sur a norte (Tabla 11) sin embargo la mayor biomasa epífita a lo largo de las distintas temporadas se registró en la estación A2b (Gráfica 16 B, C y D) con concentraciones de 2.46, 1.55 y $3.67 \mu\text{g cm}^{-2}$ para secas, lluvias y nortes respectivamente.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Estos valores son más altos a los reportados por otros autores como Tomasko y Lapointe (1991), los cuales reportaron una concentración de biomasa epífita de hasta $1.8 \mu\text{g cm}^{-2}$ en *T. testudinum*, mientras que Frankovich y Fourqurean (1997) registraron en la Bahía de Florida una concentración promedio de $0.4 \mu\text{g cm}^{-2}$ como se observa en la Figura 9.

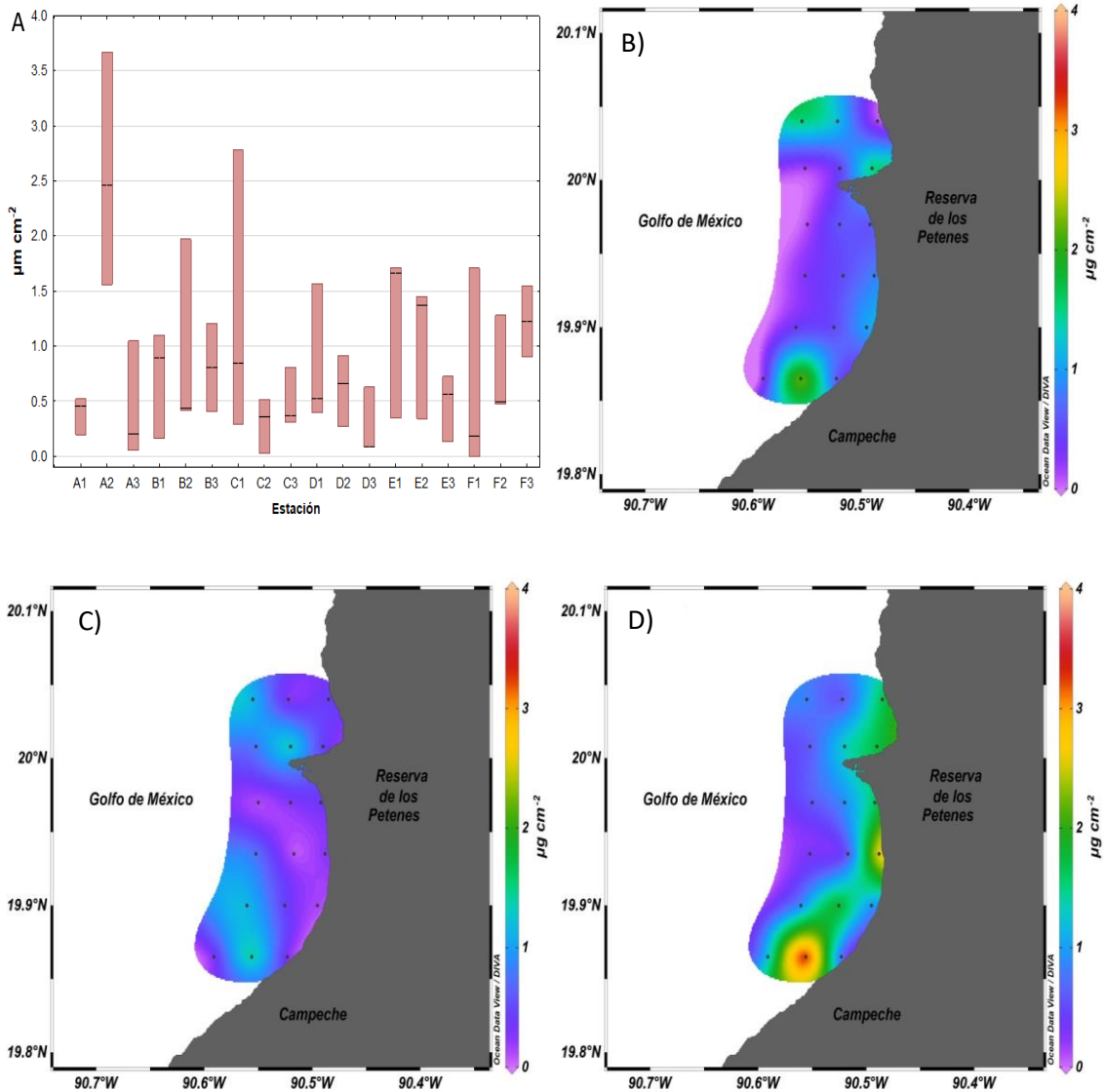
Tabla 11. Distribución de biomasa de epifitas en las distintas estaciones de muestreo y durante las distintas épocas climáticas.

Biomasa epífita $\mu\text{g cm}^{-2}$					
Estaciones	Abril	Julio	Octubre	Media	Desv. Est.
A1	0.450	0.190	0.520	0.387	0.174
A2	2.460	1.550	3.670	2.560	1.064
A3	0.050	0.190	1.040	0.427	0.536
B1	1.100	0.160	0.890	0.717	0.493
B2	0.430	0.410	1.970	0.937	0.895
B3	0.400	1.200	0.800	0.800	0.400
C1	0.840	0.290	2.770	1.300	1.302
C2	0.510	0.030	0.350	0.297	0.244
C3	0.310	0.800	0.360	0.490	0.270
D1	0.520	0.390	1.560	0.823	0.641
D2	0.650	0.260	0.900	0.603	0.323
D3	0.080	0.080	0.620	0.260	0.312
E1	1.660	0.340	1.710	1.237	0.777
E2	0.034	1.450	1.360	1.050	0.170
E3	0.130	0.720	0.560	0.470	0.305
F1	0.000	0.170	1.700	0.623	0.960
F2	1.270	0.470	0.490	0.743	0.456
F3	1.540	1.220	0.900	1.220	0.320
Media	0.708	0.551	1.232		
Desv. Est.	0.661	0.489	0.888		

Desv. Est. = Desviación estándar

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 16. Distribución espacial de biomasa epifita en *T. testudinum*. A) Diagrama de caja de biomasa epifita, B) Secas, C) Lluvias y D) Nortes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos). Nota: en el diagrama de caja y bigote la barra corresponde a la mediana y la caja al primer cuartil y tercer cuartil.

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

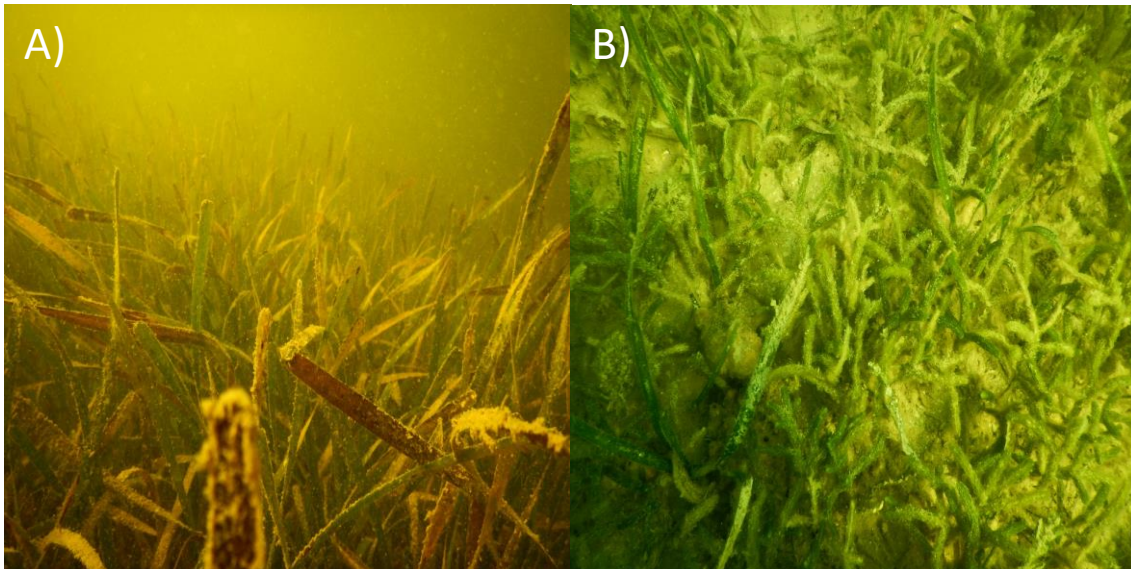


Figura 9. Colonización de epífitas sobre *T. testudinum* en estación B2 de RBLP (fotos tomadas por personal del laboratorio de pastos marinos, 2015).

IV.1.6 Organismos bentónicos

Se colectaron en total 3,226 organismos bentónicos durante abril de 2015, en 18 estaciones distribuidas a lo largo de tres transectos paralelos a la costa (“orilla”, “en medio” y “fuera”) obteniendo los siguientes resultados expresados en porcentaje en la Gráfica 17.

IV.1.6.1 Densidad y biomasa de macroinvertebrados bentónicos en la Reserva de la Biosfera Los Petenes.

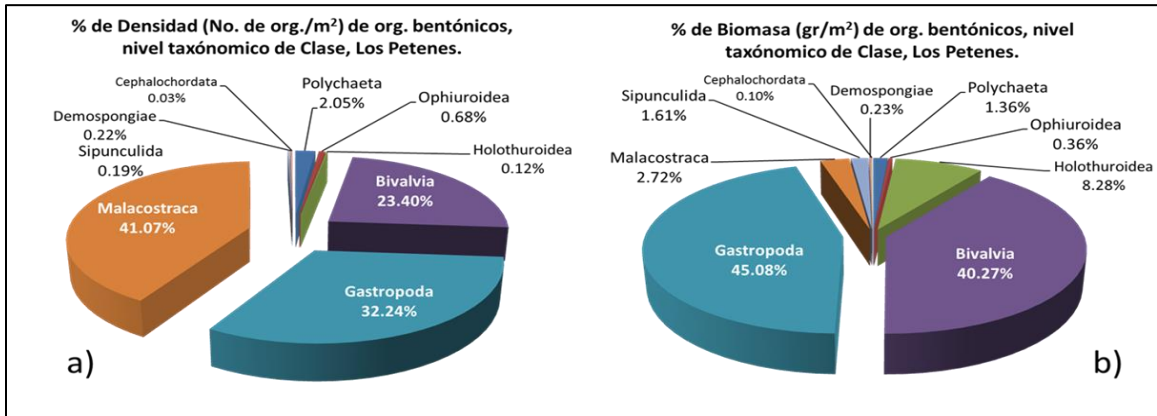
En la Gráfica 17a se observa el porcentaje de la densidad (Número de organismos por metro cuadrado) de macroinvertebrados bentónicos totales en 18 estaciones, la Clase Malacostraca presenta el mayor porcentaje con 41.07%, Gastropoda con 32.24%, Bivalvia con 23.4%, muy abajo en el porcentaje se encontraron las Clases Polychaeta con 2.05%, seguidas por las clases Ophiuroidea, Demospongiae, Sipunculida, Holothuroidea y Cephalochordata (0.68%, 0.22%, 0.19%, 0.12% y 0.03% respectivamente).

Con respecto a la biomasa (gr/m^2 ; Gráfica 17b), a pesar de que la Clase Malacostraca tuvo la mayor densidad, el porcentaje mayor de biomasa la presentó Gastropoda con el

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

45.08%, seguida de Bivalvia con 40.27%, Holothuroidea con apenas el 8.28%, el resto de las Clases están representada con escasa biomasa debido también a su poca densidad.



Gráfica 17. Porcentaje de la densidad (a) y biomasa (b) de macroinvertebrados bentónicos a nivel de Clase en RBLP, Campeche, durante un ciclo anual (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

IV.1.6.2 Densidad de macroinvertebrados bentónicos por Transecto.

En el transecto denominado “orilla” (Gráfica 18a) el mayor porcentaje de densidad de organismos correspondió a Malacostraca con 58.3%, seguida de Gastropoda con 25.5%, Bivalvia con 12.39%, muy por debajo en el porcentaje estuvieron las clases Polychaeta, Ophiuroidea, Cephalochordata y Sipunculida con 2.78 %, 0.87%, 0.08% y 0.08% respectivamente. Las Clases Demospongiae y Holothuroidea no estuvieron representadas. Cabe señalar que este transecto tuvo el mayor número de Clases presentes.

La densidad en el transecto “en medio” (Gráfica 18b) estuvo también dominada por la Clase Malacostraca con 40.8%, Bivalvia y Gastropoda con 31.05% y 26.09%, muy por debajo en el porcentaje de densidad están el resto de las Clases, Demospongiae y Cephalochordata no estuvieron presentes.

En el transecto “fuera” (Gráfica 18c) existe un cambio en la densidad de organismos con respecto a los anteriores, el mayor porcentaje fue para Gastropoda con 51.88%, Bivalvia con 29.57%, Malacostraca ahora ocupó el tercer sitio con apenas el 14.29%, muy abajo en el porcentaje está el resto de las Clases, Cephalochordata no estuvo representada en este transecto.

INFORME FINAL

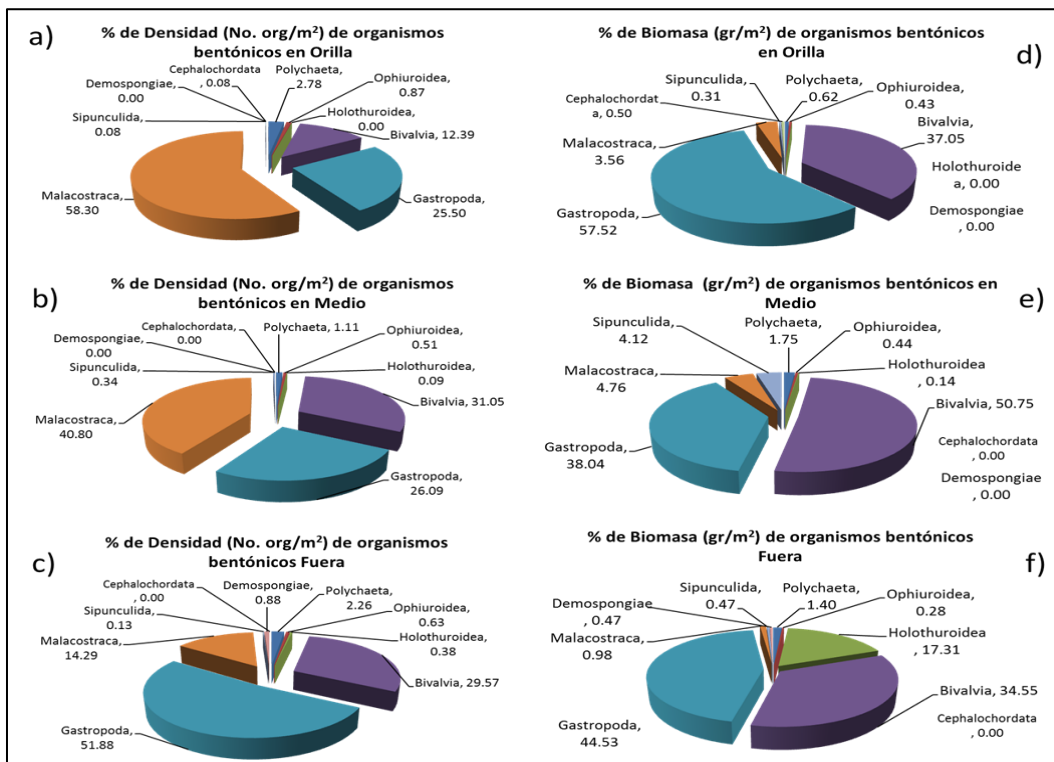
FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

IV.1.6.3 Biomasa de macroinvertebrados bentónicos por Transecto.

Para la biomasa por transecto “orilla” (Gráfica 18d) el mayor porcentaje está dominado por las Clases Gastropoda con 57.52% seguida por Bivalvia con 37.05%, seguida con poco porcentaje por Malacostraca, el resto tiene porcentajes muy escasos, las Clases Holothuroidea y Demospongiae no estuvieron representados.

En el transecto “en medio” la biomasa cambió con respecto al de la costa (Gráfica 18e). El mayor porcentaje de biomasa correspondió a la Clase Bivalvia con 50.75%, seguida por Gastropoda con 38.04%, el resto de las Clases quedó muy abajo en el porcentaje, las Clases Cephalochordata y Demospongiae no estuvieron representadas.

La distribución de biomasa de organismos bentónicos en el transecto “fuera” estuvieron dominadas por la Clase Gastropoda con 44.53% seguido de Bivalvia con 34.55% y Holoturoidea con 17.31% (Gráfica 18f) representando un 96.39% de la biomasa total, el porcentaje restante fue aportada por las otras Clases a excepción de Cephalochordata la cual estuvo ausente en las zonas más profundas.



Gráfica 18. Porcentaje de la densidad (a, b y c) y biomasa (d, e y f) de macroinvertebrados bentónicos a nivel de Clase por transecto en la RBLP, Campeche (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

IV.1.6.4 Densidad de macroinvertebrados bentónicos por Estación.

Con respecto a la densidad en el transecto “orilla” (Gráfica 19a) la Clase Malacostraca es la que presenta los más altos valores en todas las estaciones, y particularmente la estación D1 donde alcanzo el mayor porcentaje con 77.44%, seguida de la estación C1 con 59.09%, las estaciones A1 y B1 presentaron valores muy parecidos con 51.79% y 51.97% respectivamente, las estaciones E1 y F1 con 46.28% y 40.77% respectivamente. La segunda Clase con los porcentajes más altos fue Gastropoda destacando las estaciones B1 (41.77%), A1 (33.33%) y F1 (30.77%). En el transecto no se presentaron las Clases Holoturoidea, Demospongiae y Cephalochordata. Sipunculida solo estuvo en la estación E1.

Con respecto al transecto “en medio” (Gráfica 19b) la Clase con el porcentaje más abundante fue Malacostraca aunque solo fue en la estación D2 con 76.05%, la clase Bivalvia presentó los porcentajes más altos en las estaciones E2 (54.72%), A2 (44.2%) y C2 (43.96%), Gastropoda tuvo su mayor porcentaje en las estaciones B2 (45.73%) y F2 (43.28%). En este transecto no se presentaron las Clases Demospongiae y Cephalochordata, la Clase Holothuroidea solo se presentó en la estación D2, Sipunculida solo estuvo presente en la estación E2.

En el transecto “fuera” (Gráfica 19c) la Clase Gastropoda tuvo los mayores porcentajes en las estaciones E3 (68.55%), C3 (60.71%), B3 (56.39%) y D3 (43.61%); seguido de Bivalvia cuyo porcentaje más alto se registró en las estaciones A3 (40.23%) y F3 (38.98%). Malacostraca siguió disminuyendo sus valores con respecto al transecto de la costa y de en medio. Demospongiae solo estuvo presente en la estación B3 (5.26%), así como Sipunculida solo estuvo presente en la estación A3 (1.15%). Cephalochordata no estuvo presente para este transecto.

IV.1.6.5 Biomasa de macroinvertebrados bentónicos por Estación.

Con respecto a la biomasa el transecto “orilla” (estaciones más someras; Gráfica 19d) la Clase Gastropoda tuvo los más altos porcentajes (B1 = 92.95%, A1 = 68.76%, C1 = 63.5%, F1 = 52.68% y D1 = 52.68%), excepto en la estación E1 que fue ligeramente superada por Bivalvia (49.28%). Las Clases Holothuroidea y Demospongiae estuvieron ausentes mientras que Cephalochordata solo se registró en la estación A1 así como Sipunculida que solo estuvo en la estación E1.

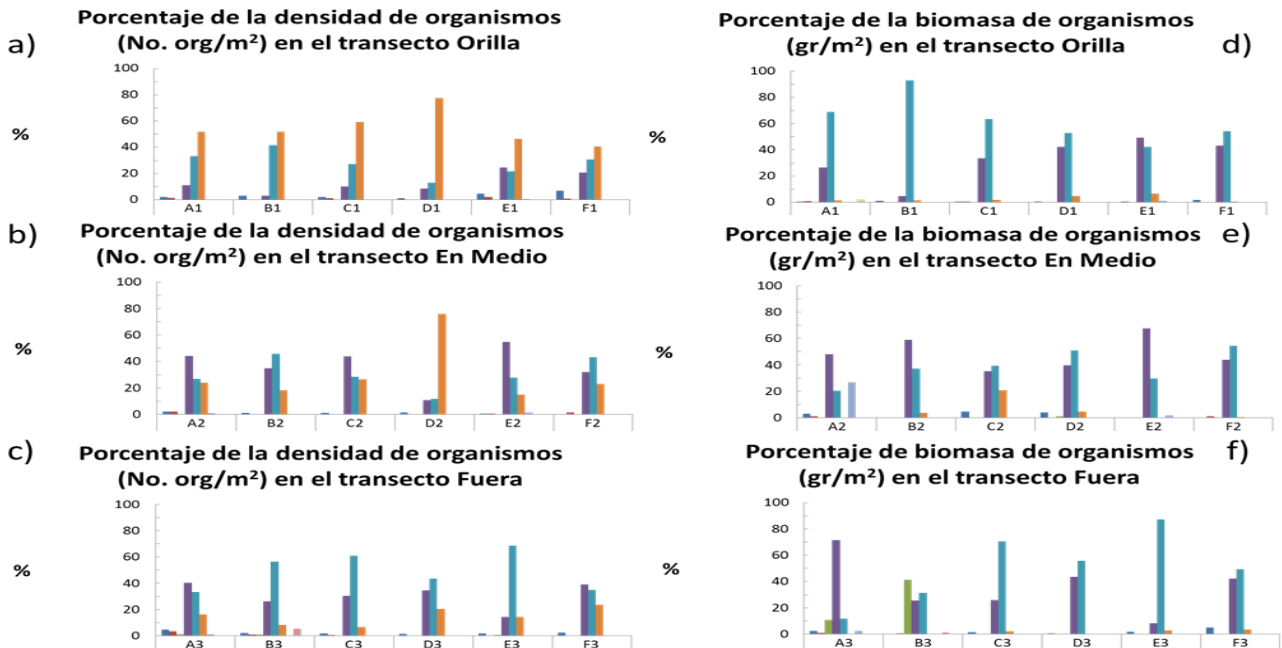
INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

En el transecto “en medio” (Gráfica 19e) la Clase con los porcentajes más altos de biomasa fueron Bivalvia en las estaciones E2 (67.55%), B2 (59.03%) y A2 (48.11%). Gastropoda tuvo el porcentaje mayor en las estaciones F2 (54.36%), D2 (50.75%) y C2 (39.47%). Sipunculida solo estuvo presente en las estaciones A2 (26.86%) y E2 (1.89%). Holothuroidea solo estuvo presente en la estación D2 (1.02%). Demospongiae y Cephalochordata solo no estuvieron presentes.

En el transecto de “fuera” (Gráfica 19f) la Clase Gastropoda tuvo los mayores porcentajes de biomasa en las estaciones E3 (87.23%), C3 (70.51%), D3 (55.6%) y F3 (49.4%) mientras que Bivalvia fue mayor en la estación A3 con un 71.51% así como Holothuroidea fue mayor en la estación B3; de manera contraria las clases Sipunculida y Demospongiae se registraron en una sola estación (A3 y B3 respectivamente).

Gastropoda, Bivalvia y Malacostraca son las únicas Clases que están presentes en todos los transectos y en todas las estaciones. Cephalochordata solo se presentó en la estación A1. La Clase Holoturoidea solo se presentó en la estación D2 (transecto de en medio) y en A3, B3 y E3 (transecto afuera). Sipunculida solo estuvo en la estación E1 (transecto Orilla), A2 y E2 (transecto en medio) y A3 (transecto Fuera). La Clase Malacostraca tiene sus mayores abundancias en el transecto cercano a la costa y va disminuyendo conforme se aleja de esta (Tabla 12).



Gráfica 19. Porcentaje de la densidad (a, b y c) y biomasa (d, e y f) de macroinvertebrados bentónicos a nivel de Clase por estación en los transectos en la RBLP, Campeche (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 12. Porcentajes de densidad y biomasa de organismos bentónicos separados por transectos en la Reserva de la Biosfera Los Petenes

	Porcentaje de la densidad de organismos																	
	"Orilla"						"En Medio"						"Fuera"					
	A1	B1	C1	D1	E1	F1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	A3	B3	C3	D3	E3	F3
Polychaeta	2.08	3.15	2.27	1.03	4.79	6.92	2.17	1.22	1.10	1.40	0.47	0.00	4.60	2.26	1.79	1.50	1.89	2.54
Ophiuroidea	1.49	0.00	1.14	0.00	2.13	0.77	2.17	0.00	0.00	0.00	0.47	1.49	3.45	0.75	0.60	0.00	0.00	0.00
Holothuroidea	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	1.15	0.75	0.00	0.00	0.63	0.00
Bivalvia	11.01	3.15	10.23	8.46	24.47	20.77	44.20	34.76	43.96	10.70	54.72	32.09	40.30	26.32	30.36	34.59	14.47	38.98
Gastropoda	33.33	41.79	27.27	13.08	21.81	30.77	26.81	45.73	28.57	11.63	27.83	43.28	33.33	56.39	60.71	43.61	68.55	34.75
Malacostraca	51.79	51.97	59.09	77.44	46.28	40.77	23.91	18.29	26.37	76.05	15.09	23.13	16.09	8.27	6.55	20.30	14.47	23.73
Sipunculida	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	0.00	0.72	0.00	0.00	0.00	1.42	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demospongiae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.26	0.00	0.00	0.00	0.00
Cephalochordata	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Porcentaje de la biomasa de organismos																	
Polychaeta	0.44	1.10	0.49	0.20	0.23	1.85	2.97	0.06	4.67	3.90	0.30	0.00	2.58	0.09	1.62	0.57	1.78	5.05
Ophiuroidea	0.84	0.00	0.62	0.00	0.55	0.16	1.24	0.00	0.00	0.00	0.32	1.27	0.70	0.38	0.02	0.00	0.00	0.00
Holothuroidea	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	10.76	41.15	0.00	0.00	0.06	0.00
Bivalvia	26.45	4.63	33.54	42.09	49.28	43.08	48.11	59.03	5.23	39.67	67.55	44.00	71.51	25.65	25.72	43.61	8.29	42.19
Gastropoda	68.76	92.95	63.50	52.68	42.31	54.27	20.52	37.07	37.47	50.75	29.79	54.36	11.84	31.42	70.51	55.60	87.23	49.40
Malacostraca	1.42	1.32	1.85	4.61	6.59	0.64	0.28	3.85	20.63	4.67	0.15	0.36	0.14	0.03	2.13	0.23	2.63	3.37
Sipunculida	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00	26.87	0.00	0.00	0.00	1.89	0.00	2.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Demospongiae	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00
Cephalochordata	2.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

IV.1.6.6 *Discusión*

Actualmente, las comunidades de pastos marinos se encuentran bajo presión por procesos tanto naturales como humanos que se presentan a distintas escalas, como son el calentamiento global, eutrofización, acidificación de los océanos, contaminación por hidrocarburos y metales, entre otros; que pueden ocasionar daño a las distintas especies y disminución o desaparición de sus poblaciones (Short y Neckles, 1999), por lo que el investigar los cambios espacio-temporales de estos ecosistemas es de suma importancia.

Aunque en este estudio se describe una significativa variabilidad temporal en la mayoría de los parámetros fisicoquímicos, la estabilidad del potencial óxido-reducción (POR) a lo largo de las temporadas de secas, lluvias y nortes, indican la dominancia de condiciones reductoras, valores que son indicadores de la presencia de reacciones biogeoquímicas en el sistema, (Wear *et al.*, 1999), procesos de reducción de fierro y sulfatos (Kim *et al.*, 2017) así como la solubilidad de metales y micronutrientes que en ambientes eutrofizados pueden ser limitantes para el crecimiento de las poblaciones de productores primarios (Szymczycha *et al.*, 2016).

Los pastos marinos crecen en sedimentos con un Potencial Redox entre -175 y + 300 mV (Terrados *et al.* 1999; Enríquez *et al.* 2001; Marbá-Duarte, 2001). La actividad de los pastos marinos es capaz de atenuar las condiciones anóxicas del sedimento dentro de las capas ocupadas por la rizosfera, el efecto que los pastos marinos tienen sobre las propiedades oxido-reducción del sedimento, se cree que es el resultado de la liberación de oxígeno a través de la raíz, y la oxidación de compuestos reducidos (por ejemplo, hierro, sulfuro) creando una zona subóxica (Marbá y Duarte, 2001).

La reserva de la Biosfera de los Petenes es la zona con la mayor extensión de VAS del país (Mijangos, 2018) y está sujeta a una dinámica donde se denota la importancia de las temporadas de lluvias y nortes, ya que hay un aumento en las descargas dulceacuícolas debido a que a partir del mes de mayo, aumentan significativamente las precipitaciones, alcanzando su máximo en el mes de Agosto (194.5 mm, CONAGUA, 2018). Esto provoca una mezcla de masas de agua y una disminución de la salinidad del sistema (Cervantes-Martínez *et al.*, 2002); estos cambios en la salinidad ocasionan una disminución en el crecimiento y biomasa, y que dicha tolerancia es menor ante cambios de tipo hipo-salino (Kahn y Durako, 2006).

No obstante, este efecto de dilución por el aporte de agua dulce, la inversión en la distribución espacial de la salinidad, siendo más salina la zona cercana a la costa que la más profunda, se debe principalmente al tiempo de exposición de la columna de agua a la luz solar, lo cual aumenta la temperatura y la tasas de evaporación (Cole *et al.*, 2018).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

El comportamiento de los STD tiene una relación directa con la conductividad debido a que como expone la EPA (1986), están compuestos por sales inorgánicas, materia orgánica y otros materiales, y su comportamiento estacional está directamente relacionado con el aumento de la precipitación o por intrusiones de agua salada (Webber-Scannell y Duffy, 2007).

Otro efecto visible de las descargas subterráneas es el cambio en el pH de la zona de estudio ya que en ambientes kársticos el agua subterránea es menos alcalina que el agua marina (Liu *et al.*, 2018), aunque los valores reportados en este estudio se encuentran dentro de los reportados por otros autores (con un pH mínimo de hasta 7.24; Bayari *et al.*, 2011). Sin embargo, la presencia de pastos marinos en la zona funciona como un amortiguador del pH, ya que el proceso de fotosíntesis influye para que los valores no sean tan bajos, (Hemminga y Duarte, 2008).

Korhonen *et al.* (2012) reportó que a un pH de 8 los pastos marinos presentan un mejor rendimiento cuántico, es decir, se optimiza el proceso de la fotosíntesis con una mayor tasa de recuperación. Las variaciones del pH pueden alterar funciones fisiológicas de estas especies, debido a que los cambios repentinos del pH, ya sea en sedimento o columna de agua, pueden afectar negativamente la actividad fotosintética.

También la influencia de los vientos provenientes del norte del Golfo de México durante la temporada de nortes, como lo es la disminución en la temperatura de la columna de agua (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009), la cual contrasta con la temporada de lluvias donde la baja acción de los vientos es menor y por lo tanto hay una mayor exposición solar, ocasionando un aumento en la temperatura de columna de agua (Varona-Cordero *et al.*, 2014). Sin embargo, esta variación estacional estuvo dentro de los rangos óptimos para *T. testudinum* según lo reportado por Zieman (1975), el cual determinó que la mayor producción de hojas es entre los 28 a los 31°C.

El aumento en la temperatura del agua debido al efecto de calentamiento global, puede ser un factor que ocasione cambios en la estructura y extensión de los pastos marinos (Walker, 1991), sin embargo, como expone Short y Neckles (1999), debido a la gran plasticidad de los pastos marinos ante cambios de temperatura, probablemente no tenga un efecto determinante en sus patrones de reproducción sexual y por lo tanto las poblaciones se mantendrían.

Los cambios en la concentración de oxígeno disuelto en el sistema se deben principalmente a procesos físicos por lo que un aumento en las corrientes o la influencia de los vientos, aumentan esta concentración (Kauppila *et al.*, 2003), así como cambios de solubilidad relacionados principalmente con la temperatura y salinidad (Libes, 2009), de tal manera que durante la temporada de lluvias el efecto de las corrientes costeras así como el efecto de la surgencia de Yucatán, incrementarían estas concentraciones (Merino, 1997). Así mismo, la actividad fotosintética de los productores primarios

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

ocasionó un aumento en la concentración de oxígeno durante la temporada de lluvias (Cole *et al.*, 2018).

Los pastos marinos requieren del oxígeno para mantener su metabolismo tanto en sus hojas como en los rizomas, por lo cual en condiciones de deficiencia de oxígeno son vulnerables a la exposición de metabolitos secundarios debido a su alta actividad metabólica, ya que la anoxia del tejido altera el crecimiento de las raíces, la absorción de nutrientes y la translocación de nutrientes y carbohidratos (Smith *et al.*, 1988), permitiendo la invasión de fitotoxinas y sulfuros (Borum *et al.* 2006).

El hecho de que en ninguna temporada se alcance más del 100% de saturación de oxígeno se debe principalmente a la gran cantidad de materia orgánica presente en algunos hábitat de pastos marinos, en donde por procesos de oxidación tiende a bajar la concentración de materia orgánica y por lo tanto el porcentaje de saturación del sistema (Viaroli y Christian, 2003), sin embargo los valores son considerados como óptimos, debido a que nunca llegan a niveles cercanos a hipoxia (concentraciones menores a 2 mg l⁻¹, Murrell y Lehrter, 2011).

Considerando los porcentajes de CO, durante la temporada de lluvias y nortes, se deduce que hubo un incremento en el aporte de materia orgánica acarreada por canales, ríos y aguas subterráneas, los cuales se depositan en los sedimentos de las praderas de pastos marinos. Los valores reportados durante este estudio (medias de 6.45%, 5.47% y 6.16% para secas, lluvias y nortes respectivamente) fueron parecidos a otros realizados en Los Petenes (Rango = 3.10 – 8.09 %; Fuentes *et al.*, 2014; Valdéz-Cruz, 2016).

Los mayores valores del porcentaje de carbono orgánico en la zona cercana a la costa, se atribuyen principalmente a sistemas en los que se presentan zonas de influencia de manglar, a densas camas de comunidades de pastos marinos y a diversas comunidades de algas (Aguilar-Salazar *et al.*, 2003; García-Hernández y Ordóñez-López, 2006) asimismo, se considera la entrada de material orgánico incluso de origen antropogénico, debido a que esta zona de estudio se encuentra influenciada por la cercanía de la ciudad de Campeche.

Los porcentajes de C.O en los sitios de muestreo disminuyen conforme se alejan de la costa, ya que la densidad de la vegetación acuática disminuye y también se incrementa la energía hidrodinámica por mareas y corrientes producidas por los vientos facilitando la oxidación de la materia orgánica (de Falco *et al.*, 2004).

La variación temporal en las concentraciones de nutrientes en columna de agua e intersticial, se debe principalmente a procesos biogeoquímicos y reciclamiento de nutrientes (Agawin *et al.*, 2017), efectos de surgencia (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2006), así como por el aporte de afluentes (ríos y aguas subterráneas; Gadner *et al.*, 2006). Sumado a estos procesos naturales, también se deben tomar en cuenta los efectos por parte de

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

la actividad antropogénica, como los procesos de eutrofización en las regiones costeras, las cuales pueden causar la formación de grandes zonas muertas como la reportada por Dodds (2006) en la desembocadura del Río Misisipi.

En la época de secas, las altas concentraciones NID en columna de agua indican un aporte por surgencias de tipo eólico (surgencia del Banco de Campeche y surgencia de la Bahía de Campeche; Merino, 1997 y Zavala-Hidalgo *et al.*, 2006), cuyos orígenes y temporalidad son distintos, ya que principalmente la surgencia del Banco de Campeche se encuentra influenciada por la Corriente de Yucatán provocando que los nutrientes resuspendidos lleguen a la costa del Golfo de México.

En el caso de la surgencia de la Bahía de Campeche, esta se presenta principalmente durante secas y es ocasionada por los vientos conocidos como “sures”, los cuales provienen de tierra y se adentran en las costas del Golfo de México, ocasionando dicha surgencia, y estos nutrientes (formas nitrogenadas como nitratos y nitritos; Rabalais, 2002) son redistribuidos en la costa debido a las corrientes costeras presentes.

El alto reciclamiento de materia orgánica por parte de los microorganismos asociados a la comunidad de pastos marinos es a través del denominado ciclo microbiano (Azam *et al.*, 1983), el cual logra la transformación de los compuestos orgánicos hacia formas inorgánicas más simples, como lo es el amonio, incrementando así el suministro de este nutriente en columna de agua y agua intersticial (Antia *et al.*, 1991), donde las especies de pastos marinos tienen la capacidad de absorber estos nutrientes a través de los rizomas y/o de las hojas (Duarte, 1995). Dicho reciclamiento es tan alto que inclusive llega a ser considerado como el principal proveedor de nitrógeno necesario por distintas especies de pastos marinos (Agawin *et al.*, 2016), debido a que la comunidad de pastos marinos funciona como hospederos para una gran cantidad de organismos fijadores de nitrógeno y amonificantes (Welsh, 2000).

En el caso de las formas fosfatadas, los vientos en la zona de estudio tienen importancia como mecanismo de resuspensión, ya que, por el suelo cárstico de la Reserva de los Petenes, suele presentar bajas concentraciones de fósforo debido a su afinidad por el carbonato de calcio y su rápida precipitación en forma de apatita (Fourqurean *et al.*, 1993). Estos nutrientes se ponen nuevamente a disposición de los productores primarios por la acción de los vientos de las épocas de nortes y en secas por los “sures” (Salas-Monreal *et al.*, 2017).

Los procesos de eutrofización cada vez más frecuentes en las costas así como el aumento de la temperatura, ocasionan la proliferación de comunidades de algas en las praderas de pastos marinos (fitoplancton, epifitas y macroalgas; Wear *et al.*, 1999), las cuales compiten por las concentraciones de nutrientes en columna de agua, provocan una disminución en la cantidad de luz disponible para la comunidad de pastos marinos (Lee *et al.*, 2007), e inclusive en el caso de las algas epifitas se ha reportado una

disminución en la disponibilidad de carbono en la superficie de las hojas (Sand-Jensen y Revsbech, 1987).

Dado que las hojas de los pastos marinos representan un sustrato altamente dinámico para la colonización de epífitas, existe una relación entre la edad del tejido a lo largo de las hojas desde las bases hasta los ápices. Este gradiente refleja el grado de colonización de epífitas; además, los microhábitats que se establecen a lo largo de las hojas están sujetos a condiciones de intensidad luminosa y fuerzas hidrodinámicas, de tal manera que en el ápice hay mayor concentración de epifitas (Mazzela y Alberte, 1986).

Estas diferencias en la colonización por epífitas también se ven reflejado en la posición de las hojas de los pastos marinos, donde las hojas más jóvenes se ubican al centro del ápice mientras que las de mayor senectud se localizan en los extremos del ápice (Gallegos *et al.*, 1993), y por lo tanto la colonización y posible daño a las hojas es en las de mayor edad. La comunidad epífita en condiciones óptimas de temperatura y concentración de nutrientes puede colonizar de manera explosiva a los vástagos de los pastos marinos, y daños en las hojas e inclusive necrosárlas (Webster *et al.*, 2002).

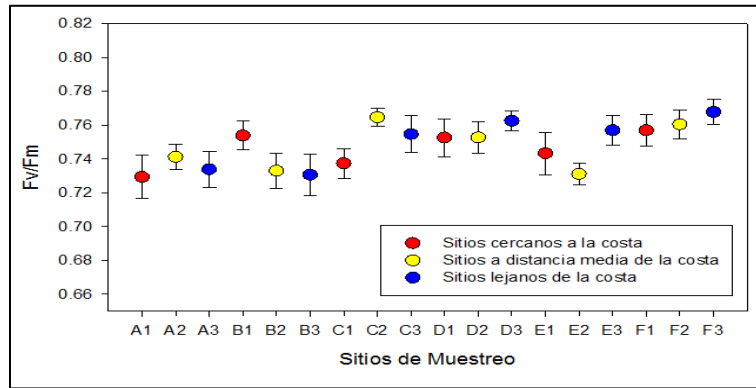
IV.2 Evaluación del estado de salud en *Thalassia testudinum*

IV.2.1 Eficiencia cuántica del FSII (F_v/F_m).

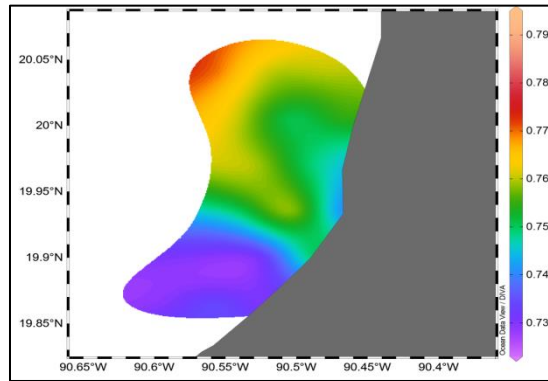
Para evaluar el estado de salud del proceso fotosintético se utilizó el parámetro "eficiencia cuántica máxima" (F_v/F_m). El resultado promedio, así como su desviación estándar, se muestra en la Gráfica 20, mientras que el patrón general de este parámetro en el área de estudio se muestra en el mapa de la Mapa 5. En ambas figuras es posible observar que los valores de la eficiencia cuántica máxima del fotosistema II ($F_v/F_m = 0.71$ a 0.74) son menores en los sitios localizados más al sur de la RBLP (A1, A2, A3, B2, B3, C1), los cuales están ubicados más cerca de la ciudad de Campeche.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 20. Eficiencia cuántica máxima (F_v/F_m) de *Thalassia testudinum* por sitio de estudio (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).



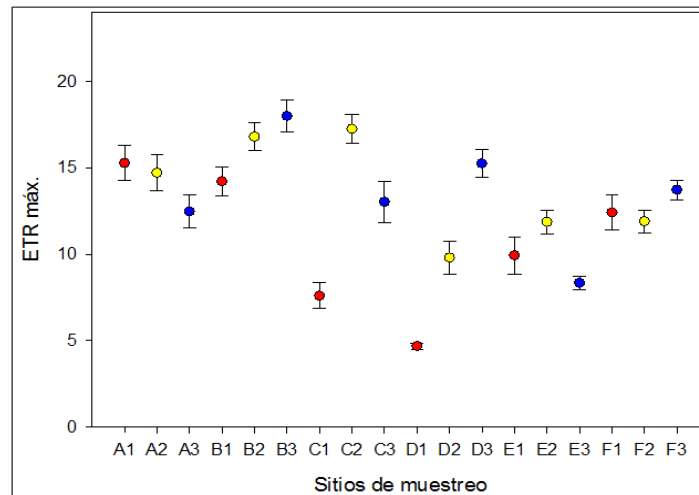
Mapa 5. Distribución de la eficiencia cuántica del FSII (F_v/F_m) en los pastos *Thalassia testudinum*. La barra de colores indica el valor del parámetro F_v/F_m (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

Es importante destacar que a medida que la distancia desde la ciudad es mayor, la eficiencia cuántica máxima del FSII en los pastos aumenta significativamente ($F_v/F_m = 0.74$ a 0.76) en los sitios C2 a D3 y E3 a F3. El punto en el que precisamente se encontró la mayor eficiencia cuántica es el punto más alejado (F3). Estos resultados confirman estudios previos realizados por nuestro grupo de investigación en los que se han detectado valores bajos de eficiencia cuántica en sitios al sur de la RBLP, los cuales pueden estar influenciados por la poca circulación, que puede ocasionar a la vez el aumento de salinidad y temperatura así como a la acumulación de descargas procedentes de la ciudad de Campeche, las cuales pueden estar causando aumento en nutrientes y en consecuencia provocando eutrofización en esta zona (datos aún no publicados). Es importante también destacar que nuestros resultados no muestran diferencias en el F_v/F_m entre sitios de diferentes distancias de la costa debido a que la disponibilidad de luz es suficiente para evitar un estrés fotosintético *T. testudinum* en las estaciones de estudio.

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

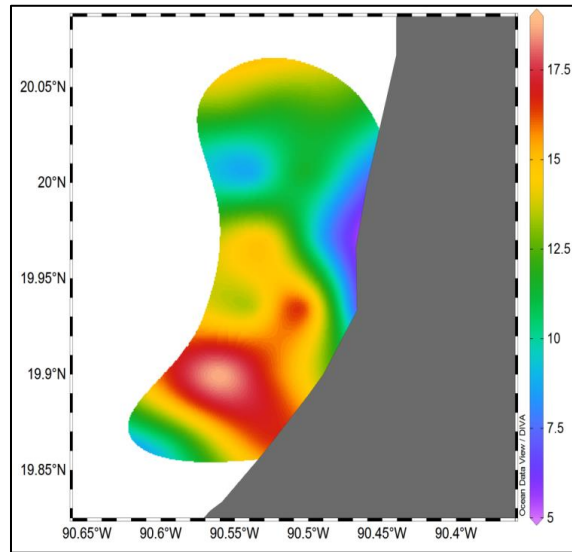
IV.2.2 Evaluación de la tasa fotosintética de *Thalassia testudinum* mediante el parámetro: Tasa de transporte de electrones del FSII (ETRmax)

En la zona de estudio, los pastos presentaron valores de ETRmax desde 5 hasta 19 μmol de electrones $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ * μmol de fotones $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Gráfica 21). En contraste a los valores de eficiencia cuántica (F_v/F_m), los valores de la tasa máxima de transporte de electrones (ETRmax) mantuvieron un patrón espacial opuesto al de la eficiencia cuántica. Los valores más altos del ETRmax, se obtuvieron en la zona sur de la RBLP (Mapa 6). Estas diferencias entre F_v/F_m y ETRmax se deben a que ambos parámetros explican diferentes componentes del proceso fotosintético. La eficiencia cuántica (F_v/F_m) es un indicador del estado del aparato de fotosíntesis y los valores bajos de F_v/F_m indican un mal estado del aparato fotosintético. En contraste, la tasa de transporte de electrones indica el grado de trabajo fotosintético, por lo que los valores altos indican un mayor funcionamiento del proceso de fotosíntesis, pero no son indicadores del estado general de la planta, ni del aparato fotosintético; es más, una mayor tasa de transporte de electrones podría implicar una condición de estrés la cual requiera de una mayor cantidad de energía para ser realizada, pero también podría indicar condiciones óptimas de crecimiento. Por ello es necesario integrar los resultados de las variables ambientales (temperatura, salinidad, pH y disponibilidad de luz) para poder dar una explicación a estos resultados.



Gráfica 21. Tasa máxima de transporte de electrones por sitio para el especie *Thalassia testudinum* (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Mapa 6. Distribución de la Tasa máxima de transporte de electrones (ETRmax) en los pastos *Thalassia testudinum* de la Reserva de la Biosfera Los Petenes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

IV.2.3 Irradiancia de saturación de la fotosíntesis (E_k) en *Thalassia testudinum*

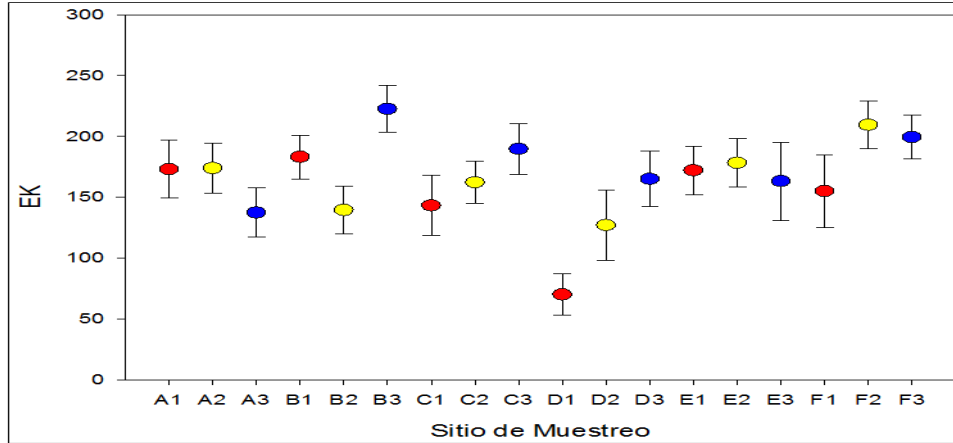
La irradiancia de saturación es la luz necesaria para que el aparato fotosintético funcione al máximo, por lo tanto, es un indicador del estado de aclimatación de la planta al flujo de luz que recibe. En la Gráfica 22 es posible observar los valores promedio de esta variable y en el Mapa 7 se observa el patrón espacial de esta variable.

A través del mapa es posible observar los sitios donde el E_k presenta los mayores valores (A3, B1, B3, F2y F3). Los valores altos del E_k representan plantas aclimatadas a valores altos de luz, posiblemente por mayor penetración de luz debido a la menor concentración de partículas suspendidas en el agua como en el caso de los pastos de los sitios alejados de la costa, por el contrario los pastos colectados del sitio B1 que también presentan E_k alta, se encuentran en sitios muy someros y están expuestos a la luz directa del sol en función de la marea, por lo que ciertamente están expuestos a mayores intensidades de luz. Por el contrario, los sitios que presentan menores valores de E_k como los puntos A3, D1 y D3, representan plantas aclimatadas a muy poca luz. Los puntos D1 y D3, se encuentran altamente influenciados por una salida natural de agua proveniente del manglar, la cual presenta alta concentración de sustancias coloridas como los taninos y partículas suspendidas las cuales atenúan considerablemente la entrada de luz, por el contrario, el punto A3 fue el punto más profundo (5.0 m) por lo que la entrada de luz en este sitio es mucho menor. Nuestros resultados demuestran que la penetración de luz en la pradera marina está sometida a varios factores, de los que destacan la concentración

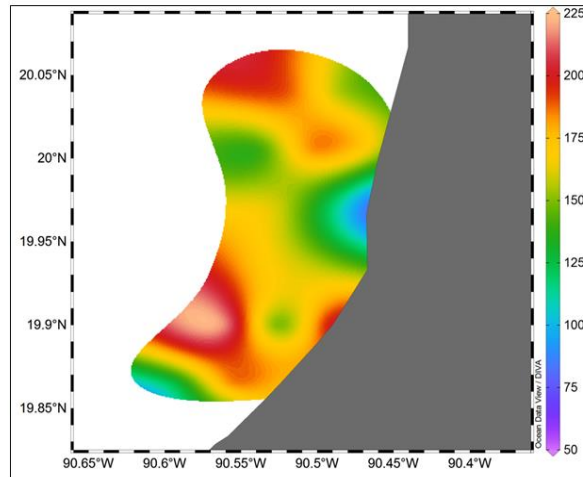
INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

de partículas suspendidas y sustancias coloridas en la columna de agua y la profundidad que por sí sola es capaz de atenuar la concentración de luz exponencialmente.



Gráfica 22. Irradiancia de saturación (E_k) por sitio, para el pasto marino *Thalassia testudinum* (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

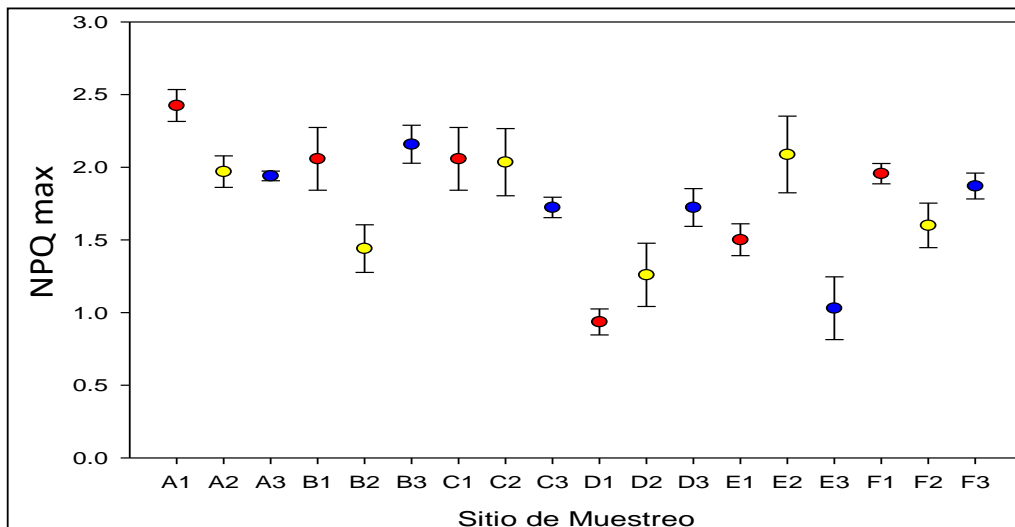


Mapa 7. Distribución de la irradiación de saturación (E_k) en los pastos *Thalassia testudinum* de la Reserva de la Biosfera Los Petenes (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

IV.2.4 Capacidad de fotoprotección del pasto marino *Thalassia testudinum* en la pradera marina de la reserva de la biosfera Los Petenes.

La capacidad de fotoprotección se mide indirectamente mediante la disminución de la fluorescencia de la clorofila *a*, el parámetro que se obtiene de esta razón es conocido como NPQ por sus siglas en inglés (Non Photochemical Quenching of Chlorophyll *a*). Los valores más altos indican mayor capacidad de fotoprotección y los valores menores indican menor capacidad de fotoprotección. Sin embargo, este parámetro también se encuentra alto en condiciones de estrés directamente cuando parte del aparato fotosintético se encuentra inactivado. En el caso de nuestros resultados (Gráfica 23), es posible observar que el valor más alto del NPQ se obtuvo en el sitio A1, este sitio en particular no es el que recibe mayor cantidad de luz, ya que como se mencionó antes el sitio B1 es el que recibe más luz debido a que se encuentra expuesto temporalmente a la luz directa en función de la marea. Con este antecedente podemos inferir que este sitio en particular (A1) presenta una condición de estrés que estimula la formación de NPQ aún en ausencia de alta intensidad de luz en su entorno. Por el contrario, el sitio D1, es el mejor ejemplo de un comportamiento del NPQ totalmente dependiente de la luz que recibe la planta ya que el punto D1 se encuentra en una saliente de agua de manglar altamente concentrada en partículas suspendidas y taninos que atenúan drásticamente la luz, en consecuencia, la luz que reciben es tan baja que la planta no necesita una capacidad de fotoprotección alta, lo que se refleja en el valor más bajo de NPQ. Además del punto A1, otros puntos cercanos a la ciudad de Campeche (A2, A3, B1, B3, C1 y C2) también tienen valores altos en comparación de los puntos C3 al E1, es muy probable que esta diferencia se deba a que los primeros presentan alguna perturbación causante de estrés mientras que los sitios con NPQ menores carecen de esta perturbación.



Gráfica 23. Capacidad de fotoprotección (NPQmax) por sitio, para el pasto marino *Thalassia testudinum* (elaboración con datos medidos por personal del laboratorio de pastos marinos).

IV.3 BIOMARCADORES

En la Tabla 13, se presentan los valores promedio y su respectiva desviación estándar para cada uno de los biomarcadores medidos en las muestras de *T. testudinum* para cada una de las temporadas. La concentración de clorofila más alta fue en la época de secas (0.30 ± 0.07 mg/g) y, la menor, fue en la época de lluvias (0.18 ± 0.06 mg/g) lo cual podría ser un factor de estrés, ya que éstas están relacionadas directamente con la fotosíntesis, la producción de oxígeno y la asimilación del carbono en la planta por lo que, al disminuir estos factores podría repercutir en la disminución de las praderas, los patrones se repiten en la concentración de clorofila b y clorofilas totales, en cuanto a la relación a:b el menor se presentó en lluvias (1.31 ± 0.10 mg/mol), lo cual podría significar que en esta temporada la planta presenta una menor plasticidad fisiológica.

Con respecto a los resultados de azúcares, se presentó el promedio más alto en el periodo de lluvias (0.27 ± 0.07 mg/g), lo cual podría indicar un estado de estrés, ya que los pastos marinos transportan sus reservas de carbohidratos de la raíz a las hojas como un mecanismo de rescate ante un impacto.

La producción de metabolitos secundarios, como los compuestos fenólicos, está relacionada con situaciones de estrés, por lo que la temporada de lluvias donde se presentó el promedio más alto (0.27 ± 0.07 mg/g) podría representar un factor estresante para las praderas.

Por otro lado, en la temporada de lluvias se presentó el menor nivel de producción de proteínas (9.21 ± 2.39 mg/ml), lo cual está inversamente relacionado con la lipoperoxidación que presenta su mayor promedio en lluvias (0.75 ± 0.14 nmol/mg), se infiere que podría ser debido a los altos niveles de lipoperoxidación que, a su vez, representa la presencia de especies reactivas de oxígeno, las cuales suprimen la síntesis de casi todas las proteínas teniendo como consecuencia la inhibición de la reparación del daño fotosintético (Murata *et al.* 2007).

Los resultados de los biomarcadores en general muestran información biológica importante sobre el estado en el que se encuentra el área de estudio, esta información puede ser de gran utilidad para generar una alerta temprana de señales de estrés, dichas señales se observaron principalmente en la temporada de lluvias y nortes, además los patrones de comportamiento estacional en cuanto a situaciones estresantes nos muestran evidencias dinámicas por medio de los biomarcadores y a través de estos se pueden evaluar los efectos de estresores sobre los pastos marinos y a su vez los resultados que se muestran en la Tabla 13 podrán ser considerados para evaluar los factores estresantes sobre el pasto marino *Thalassia testudinum*.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

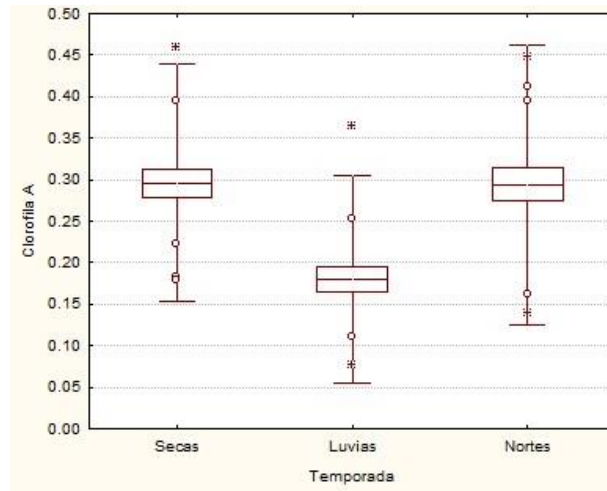
Tabla 13. Resultados de biomarcadores en *Thalassia testudinum* en tres épocas del año. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

	Abril (Secas) Primer muestreo			Junio (Lluvias) Segundo muestreo			Octubre (Nortes) Tercer muestreo		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Clorofila a (mg/g)	0.18	0.46	0.30 ± 0.07	0.08	0.36	0.18± 0.06	0.14	0.45	0.29± 0.08
Clorofila b (mg/g)	0.11	0.33	0.21± 0.06	0.06	0.27	0.13± 0.04	0.14	0.35	0.25± 0.06
Clorofilas totales (mg/g)	0.29	0.81	0.51± 0.13	0.14	0.63	0.31± 0.11	0.30	0.80	0.54± 0.13
Relación a/b (mg/mol)	1.21	2.06	1.47± 0.20	1.21	2.06	1.47± 0.48	0.98	1.27	1.31± 0.10
Azúcares (mg/g)	0.10	0.69	0.26± 0.17	0.16	0.39	0.27± 0.07	0.05	0.18	0.11± 0.04
Fenoles (mg/g)	0.09	0.75	0.23± 0.15	0.16	0.39	0.25± 0.07	0.06	0.29	0.14± 0.07
Proteínas (mg/ml)	13.37	30.47	23.74± 4.35	6.49	15.00	9.21± 2.39	24.04	32.63	28.16± 2.05
Lipoperoxidación nmol/mg proteína	0.40	0.89	0.53± 0.12	0.44	0.95	0.75± 0.14	0.28	0.60	0.36± 0.07

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

IV.3.1 Clorofila a

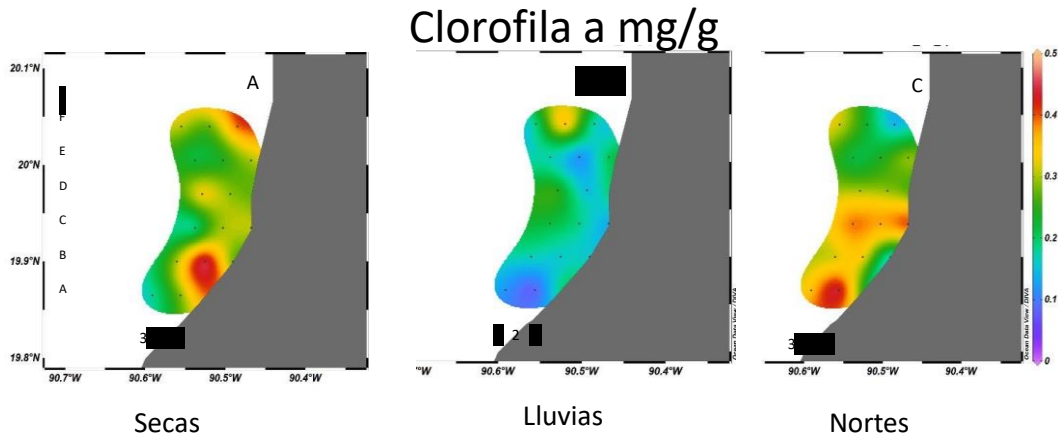
En la Gráfica 24 se muestra la variación estacional de las concentraciones de clorofila a; se puede observar que, en la temporada de lluvias, los niveles muestran diferencias estadísticamente significativas con las épocas de secas y nortes (ANOVA; $\alpha=0.05$, $p < 0.05$, $F=14.4$).



Gráfica 24. Variación temporal de la concentración de clorofila a (mg g^{-1}). (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

En cuanto a la distribución espacial (Mapa 8), se observó una menor cantidad de clorofilas en el mes de junio, correspondiente a la temporada de lluvias donde el valor promedio fue de 0.18 mg/g con niveles mínimos de 0.08 y máximos de 0.36 mg/g reportándose el valor mínimo en el sitio A2 el cual es el sitio de muestreo más cercano a la ciudad de Campeche; el valor máximo se registró en el sitio F2 uno de los sitios más alejados de la costa y la ciudad para la misma temporada. El promedio de la clorofila a aumenta en la época de nortes (0.29 mg/g) de manera similar al de secas (0.30 mg/g), con la diferencia de que las concentraciones de clorofila b son muy similares a los valores registrados en este estudio para clorofila b, por lo que la relación muestra resultados anómalos lo cual se puede relacionar con alguna situación de estrés. Destaca la estación A2 en secas y lluvias, debido a que los resultados registraron valores anómalos frente a la costa de la ciudad de Campeche en donde los niveles de clorofila fueron muy bajos, por lo que se recomienda tener un monitoreo sobre el mismo, ya que es probable que dicho efecto se deba a la cercanía de las actividades antropogénicas (descargas de aguas residuales y otros contaminantes de la ciudad).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Mapa 8. Variación espacial de las concentraciones de clorofila a en la RBLP. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

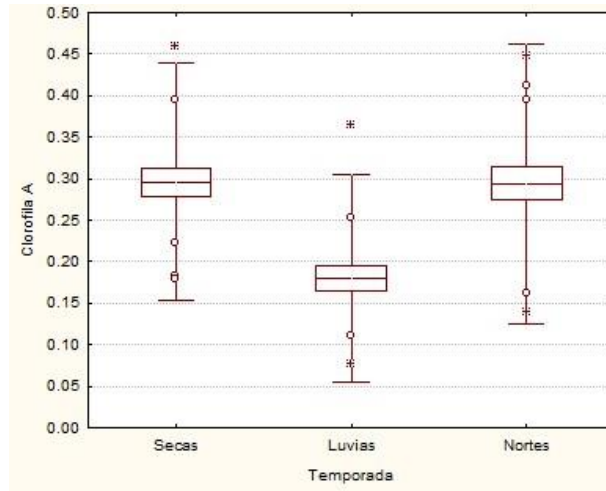
IV.3.2 Clorofila b

En la Gráfica 25 se muestra la variación estacional de las concentraciones de clorofila *b*, las cuales tuvieron un comportamiento similar al de la clorofila *a*. Específicamente, la temporada de lluvias presentó valores promedio significativamente menores a los registrados en la temporada de nortes y secas.

(ANOVA; $\alpha=0.05$, $p < 0.05$, $F= 24.1$). Así mismo, se puede observar que los niveles de clorofila *b* aumentan en el periodo de nortes con una media de 0.25 mg/g y un máximo de 0.35 mg/g.

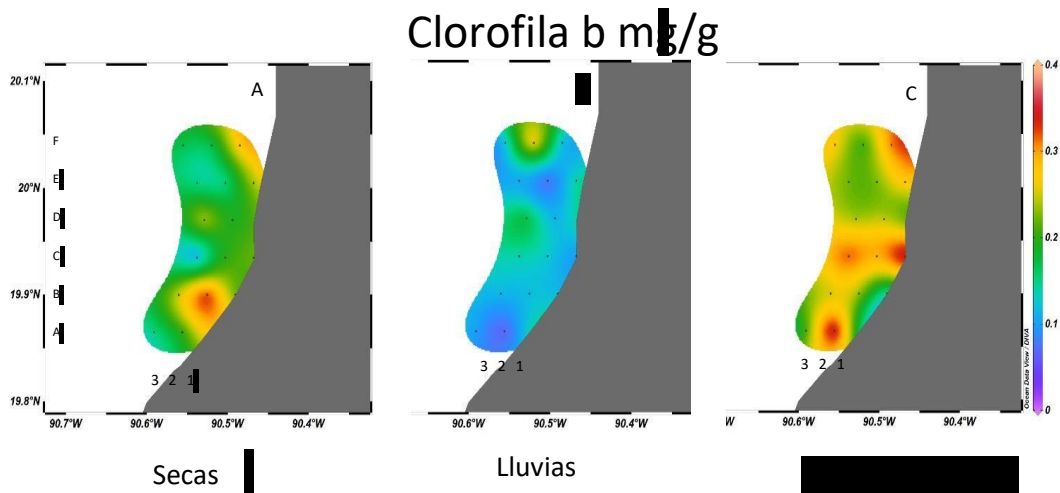
INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 25. Variación temporal de la concentración de clorofila *b* (mg g^{-1}). (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

La clorofila *b* trabaja en un rango de absorción de luz distinto al de la clorofila *a*, es decir absorbe la luz no visible de color azul, para completar el espectro de absorción visible de la clorofila *a*. En el Mapa 9 se puede observar que al igual que la clorofila *a*, la clorofila *b* presentó una menor concentración en el mes de junio, correspondiente a la temporada de lluvia (Tabla 12) con un promedio 0.13 mg/g y un valor mínimo de 0.06 mg/g correspondiente al sitio A2. El promedio más alto (0.25 mg/g) se presentó en la temporada de nortes (Mapa 9) (0.25 mg/g) mostrando su nivel máximo en el sitio C1 (0.35 mg/g) y su nivel mínimo en el sitio B1 (0.14 mg/g).

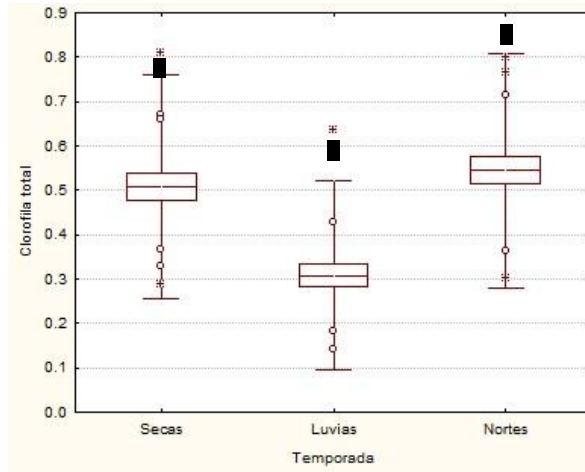


Mapa 9. Distribución espacial de la concentración de clorofila *b*. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

IV.3.3 Clorofilas totales

En el presente estudio se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de clorofilas totales, siendo el periodo de lluvias (ANOVA; $\alpha=0.05$, $p < 0.05$, $F= 19.5$) el que presentó los valores más bajos (Gráfica 26).

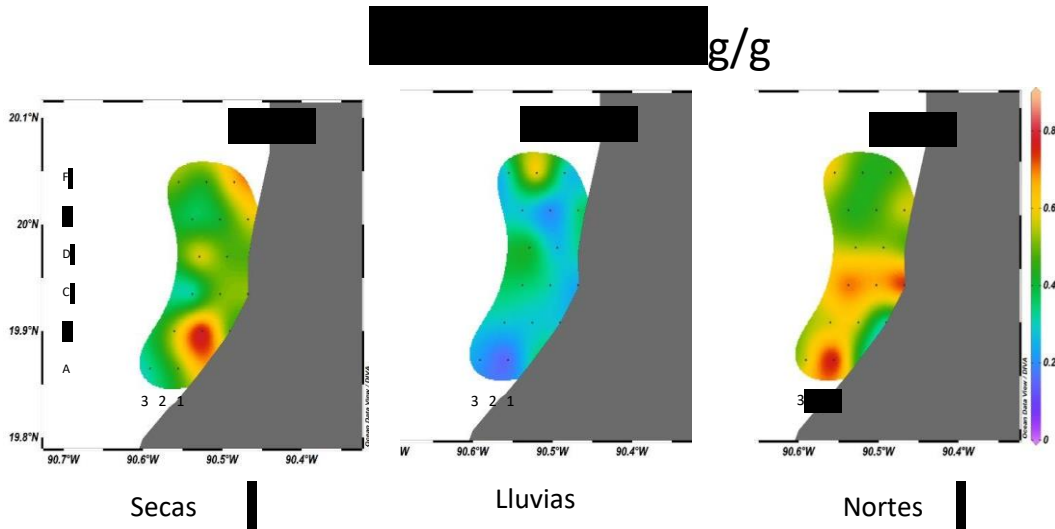


Gráfica 26. Concentración de clorofila total durante secas, lluvias y nortes. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

Las concentraciones de clorofilas totales presentaron un promedio de 0.32 mg/g en la temporada de lluvias con un valor mínimo de 0.14 mg/g en el sitio A2 cercano a la ciudad de Campeche; en contraste, las temporadas de nortes y secas fueron similares con promedios de 0.55 y 0.51 mg/g respectivamente. En la distribución espacial de este parámetro se pudo observar el valor más alto en el sitio B2 en la temporada de secas (Mapa 10A) 0.81 mg/g. Éstos resultados son similares a los presentados por Cabello-Pasini *et al.* (2004), en el presente trabajo los niveles más altos se obtuvieron en la temporada de nortes (Mapa 10C) lo cual podría deberse a una posible estimulación causada por la temporalidad, ya que al incrementar el movimiento superficial del agua en esta temporada disminuye la penetración de luz al aumentar la turbidez del agua, esto provoca que los pastos produzcan mayor cantidad de clorofilas con la finalidad de aprovechar la poca disponibilidad de luz; así la baja eficiencia fotosintética produce una respuesta compensatoria en la que se incrementan las concentraciones de clorofila (Lee y Dunton, 1997). Se recomienda realizar un monitoreo sobre aquellos sitios que mostraron niveles bajos reiteradamente, ya que pueden evidenciar alguna situación de estrés.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



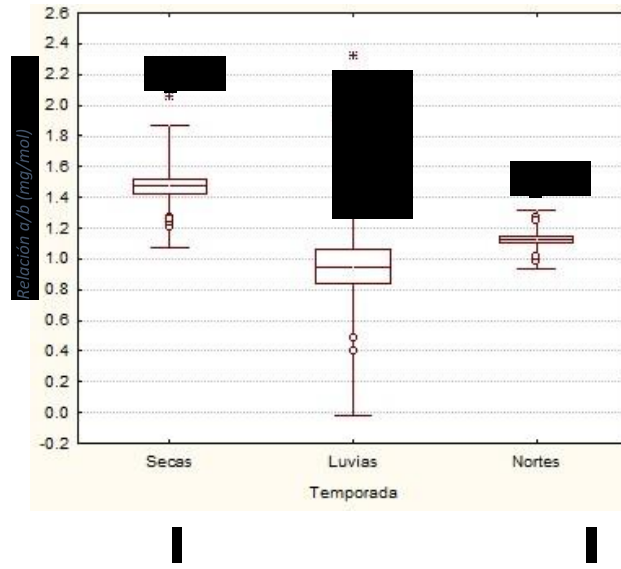
Mapa 10. Distribución espacial de clorofila total. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

IV.3.4 Relación de clorofilas *a/b*

En la Gráfica 27 se presentan los valores de la relación clorofila *a*/clorofila *b* (Chl *a/b*), los cuales muestran diferencias significativas en la época de lluvias según la prueba estadística Kruskal-Wallis ($H= 3, 132, 155, p < 0.05$). El rango típico para la adaptación genética depende de la relación Chl *a/b*, y por consiguiente la clasificación que se le dará a la planta (sol o sombra); para plantas de sombra los valores son 1.6–2.2 mg/mol y, para plantas de sol, es de aproximadamente 2.2–3.4 mg/mol (Celdran, 2017), encontrando en el presente estudio los niveles más altos en las temporadas de secas con 2.06 ± 0.19 mg/mol y un promedio de 1.47 mg/mol, mientras que las temporadas de lluvias y nortes muestran niveles bajos con promedios de 0.95 ± 0.48 mg/mol y 1.13 ± 0.09 mg/mol, respectivamente, por lo que los pastos marinos presentan resultados similares a las plantas de sombra y, por lo consiguiente, su plasticidad fisiológica es menor.

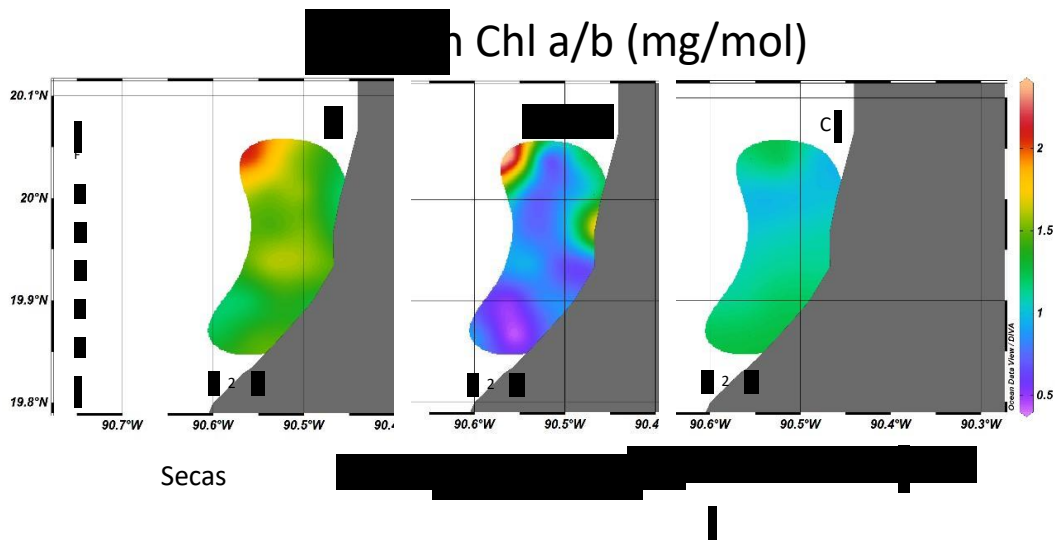
INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 27. Variación temporal de la relación de clorofila a/b. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

En el Mapa 11 se muestra que los niveles más bajos para las temporadas de lluvias y nortes (0.95 ± 0.48 mg/ mol y 1.13 ± 0.09 mg/mol), por lo que en estas temporadas la plasticidad fisiológica es menor, es decir, las praderas de pastos marinos presentan una mayor vulnerabilidad ante eventos estresores.

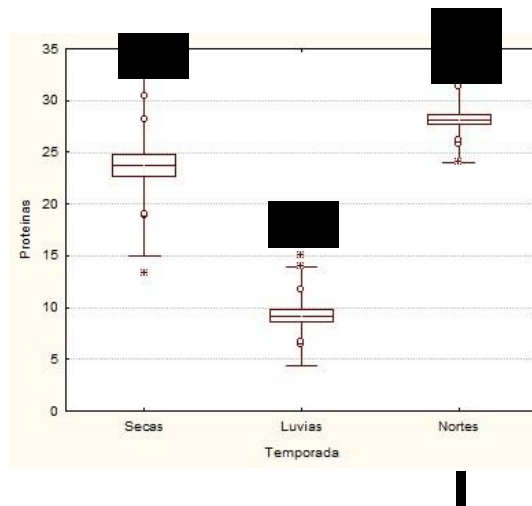


Mapa 11. Distribución espacial de la relación de clorofila a/b. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

IV.3.5 Proteínas

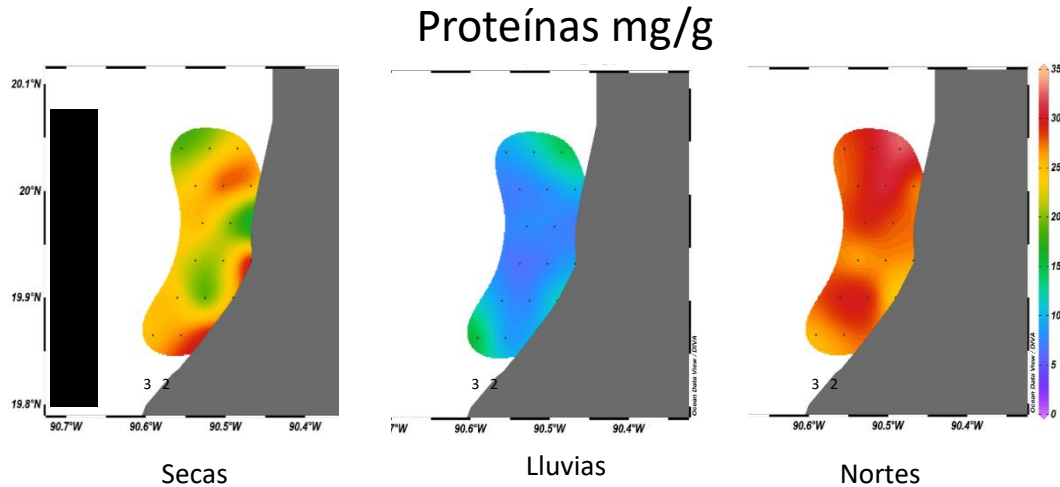
En la Gráfica 28 se muestran las concentraciones de proteínas, trabajos previos relacionan la disminución de proteínas en las hojas de *Thalassia testudinum* con el daño fotosintético (Murata *et al.* 2007). En el presente estudio se encontraron diferencias significativas entre cada uno de los muestreos (ANOVA; $\alpha=0.05$, $p < 0.05$, $F= 184.02$). La concentración más alta de proteínas se registró en la temporada de nortes con un promedio de 28 mg/ml, presentando su nivel máximo en el sitio F1 (32.63 mg/ml), mientras que sus niveles más bajos se registraron en los sitios A y B. El promedio de proteínas más bajo (9.36 mg/ml) se registró en el periodo de lluvias (Mapa 12) y en el periodo de secas se registró un promedio de 23.55 mg/ml donde el nivel máximo fue en el sitio C1 (30.38 mg/ml) y en mínimo en el B2 (18.83 mg/ml).



Gráfica 28. Distribución temporal de las concentraciones de proteínas en RBLP (mg/g). (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

De acuerdo con Nishiyama *et al.* (2006), los organismos fotosintéticos han desarrollado un proceso de reparación para evitar la acumulación del daño fotosintético que consiste en la síntesis de proteínas, además, se ha encontrado que los niveles altos de especies reactivas de oxígeno suprimen la síntesis de casi todas las proteínas teniendo como consecuencia la inhibición de la reparación del daño fotosintético, como se puede observar en la temporada de lluvias donde los niveles de proteínas son bajos (Mapa 12).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Mapa 12. Distribución espacial de la concentración de proteínas (mg/g). (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

IV.3.6 Lipoperoxidación

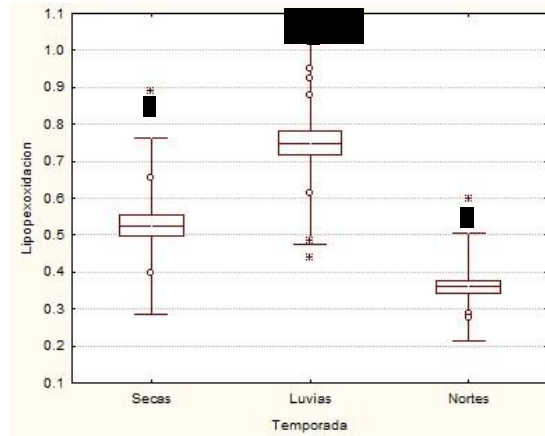
La peroxidación lipídica se produce en la formación y propagación de radicales de lípidos, la absorción de oxígeno, un reordenamiento de los dobles enlaces insaturados en los lípidos, y la eventual destrucción de los lípidos de membrana, produciendo una variedad de productos de degradación, incluyendo alcoholes, cetonas aldehídos, y éteres (Buegue y Aust, 1978). Se puede observar que la mayor cantidad de estrés oxidativo se presentó en el temporada de lluvias (Mapa 29) con un promedio de 0.74 MDA nmol/mg proteína, el nivel más alto se registró en C3 y D1 con valores de 0.9 MDA nmol/mg proteína, mostrando que, en la temporada de lluvias es muy probable que los pastos se encuentren bajo una situación de estrés.

Los niveles más bajos de estrés oxidativo se registraron en la temporada de secas (Mapa 29) con un promedio de 0.37 MDA nmol/mg proteína, mientras que, los niveles más altos se registraron en los sitios B1 y A, mostrando de esta forma que debido a la cercanía que se tiene con la ciudad es posible que ahí se estén llevando a cabo actividades antropogénicas contaminantes que estén causando estrés oxidativo sobre el pasto marino.

En el Mapa 13 se muestran los valores de lipoperoxidación donde se encontraron diferencias significativas entre cada uno de los muestreos (ANOVA; $\alpha=0.05$, $p < 0.05$, $F=53.4$)

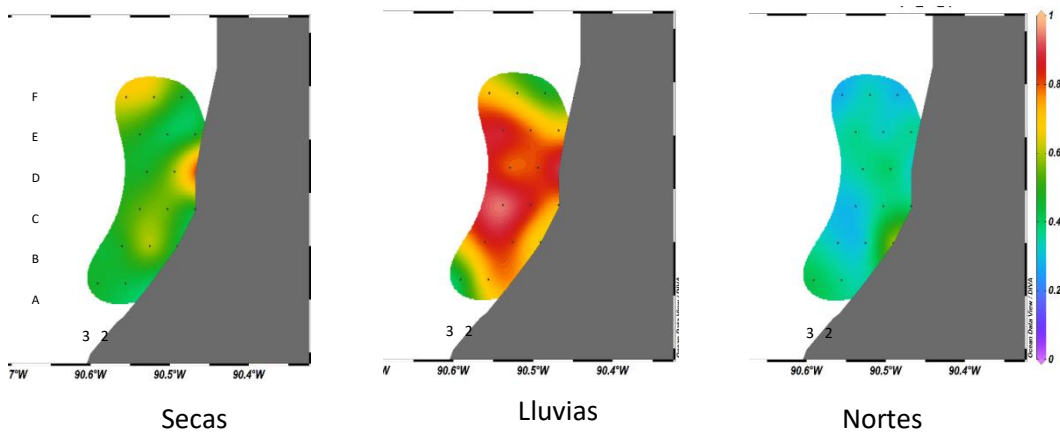
INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Gráfica 29. Concentraciones de lipoperoxidación durante secas, lluvias y nortes (MDA nmol mg/proteína). (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

Lipoperoxidación MDAnmol/mg proteína



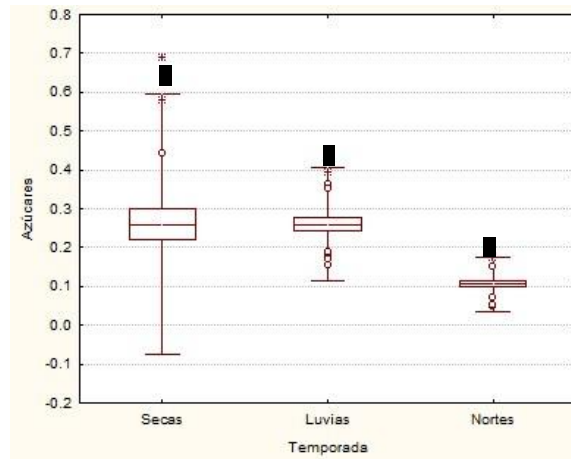
Mapa 13. Distribución espacial de lipoperoxidación. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

La evaluación de los diferentes biomarcadores en los pastos marinos de la RBLP durante un ciclo anual, representan el primer reporte de estos indicadores de estrés y conforman una primera línea base para este ecosistema. La importancia de estos resultados radica en la posibilidad de que sean usados para evaluar los efectos de otros factores de estrés como pudiera ser la presencia de hidrocarburos resultado de un derrame accidental, lo cual es probable ya que la RBLP se encuentra cerca de la Sonda de Campeche, donde como ya se ha mencionado se producen y transportan cantidades importantes de hidrocarburos.

IV.3.7 Azúcares

En la Gráfica 30 se muestra la variación estacional de las concentraciones de azúcares, se puede observar que los niveles de la temporada de nortes muestran diferencias estadísticamente significativas con secas y lluvias, de acuerdo con la prueba estadística Kruskal-Wallis ($H= 286,468$, $p < 0.05$). Así, el periodo de nortes representa mayor estrés en cuanto a este marcador, ya que los azúcares son importantes para la resistencia de los pastos marinos ante factores de estrés, lo cual podría indicar, además que existe una baja asimilación de CO_2 y, por lo tanto, una ausencia de azúcares, por lo que se recomienda analizar la concentración de azúcares en la raíz.



Gráfica 30. Variación temporal de azúcares totales (mg/g). (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

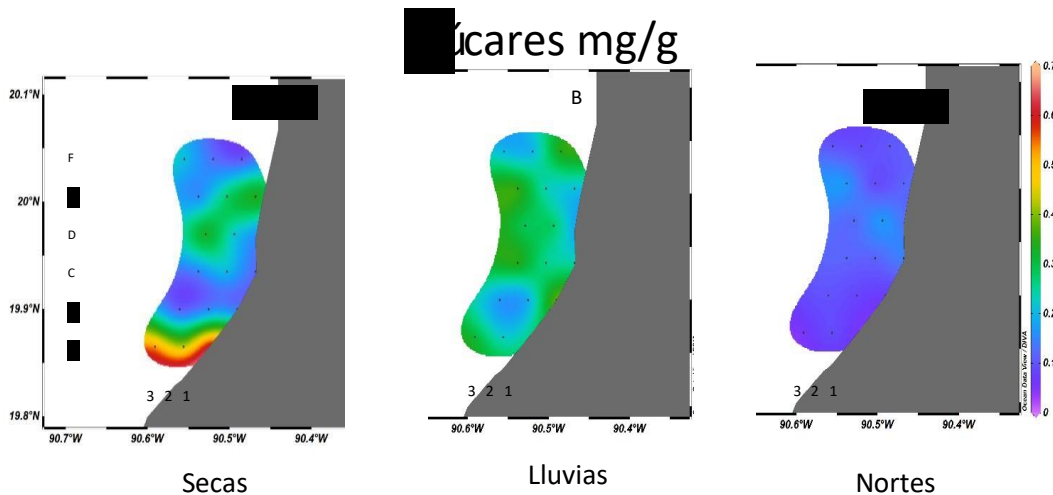
Los azúcares son importantes en la resistencia de las plantas ante eventos de estrés, al servir como un "mecanismo de rescate", los pastos marinos asignan una parte sustancial

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

de su biomasa bajo el suelo de órganos de almacenamiento (rizomas), estas estructuras sirven como reserva para apoyar el crecimiento de la planta y el mantenimiento durante períodos de baja capacidad fotosintética.

Se puede observar que durante la época de lluvias se registró el promedio más alto de concentración de azúcares en las muestras de hojas del pasto marino *T. testudinum* (0.27 mg/g), aunque en la temporada de secas donde se presenta un promedio (0.26 mg/g), la importancia de este es que sobresalen algunos sitios más altos (Mapa 14A) dichos sitios A1, A2 y A3 obtuvieron resultados de 0.69, 0.44 y 0.58 mg/g, respectivamente, siendo estas zonas cercanas a la ciudad, de igual forma en la época de lluvias se muestran con mayor concentración los sitios cercanos a la ciudad de Campeche y la costa, lo cual se puede relacionar con la poca penetración de luz para llevar a cabo la fotosíntesis, los niveles más bajos se encuentran en la temporada de nortes (30 mg/g) con lo que se puede inferir que los niveles de estrés son bajos, aunque existe la posibilidad que, debido a la deficiencia de CO₂ no se logren metabolizar azúcares de forma adecuada. Los sitios A y B en la temporada de secas y lluvias coinciden presentando niveles altos de azúcares, por lo que se recomienda realizar monitoreos para identificar las posibles fuentes antropogénicas que provocan esta respuesta de estrés en los pastos.



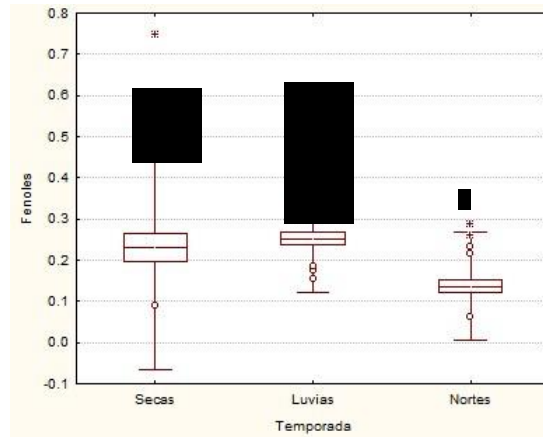
Mapa 14. Distribución espacial de la concentración de azúcares en RBLP. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

IV.3.8 Fenoles

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

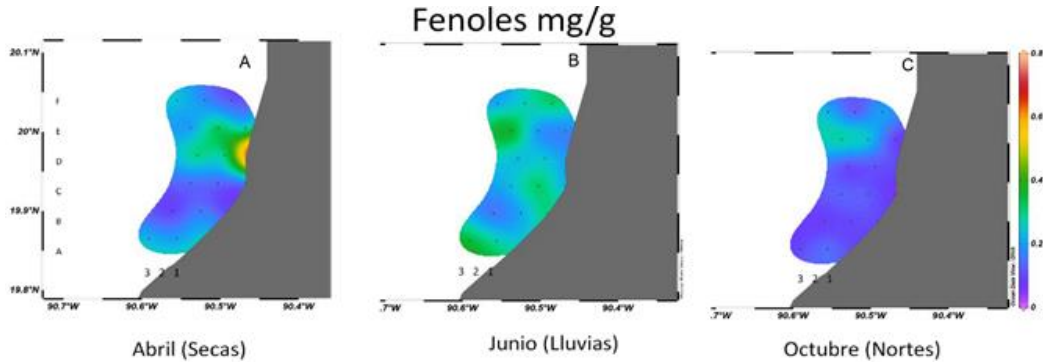
Las concentraciones de fenoles muestran un comportamiento parecido al de los azúcares; en la Gráfica 31 se pueden observar concentraciones menores estadísticamente significativas entre la temporada de nortes comparado con las temporadas secas y lluvias, de acuerdo con la prueba estadística Kruskal-Wallis ($H= 1, 749, 237, p < 0.05$).



Gráfica 31. Concentración de fenoles durante secas, lluvias y nortes (mg/g). (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

Los fenoles son metabolitos secundarios que regulan la actividad metabólica y sirven como mecanismo de defensa, por lo que se producen ante una situación de estrés (Ávalos y Pérez-Urria, 2009). En este estudio los valores más altos de fenoles se presentaron en el sitio D1 durante la temporada de secas con 0.75 mg/g, sin embargo se pueden observar valores anómalos distribuidos el periodo de lluvias (Mapa 15B) que aunque tienen un promedio de 0.25 mg/g presenta algunos valores anómalos en los sitios cercanos a la ciudad de Campeche (Mapa 15 A y B) resaltan algunos sitios cercanos a la ciudad de Campeche y de la misma forma el sitio E, lo cual puede significar que están respondiendo a alguna situación de estrés.

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Mapa 15. Distribución de la concentración de fenoles en RBLP. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

IV.3.9 Concentraciones de hidrocarburos en sedimentos.

En las 17 muestras analizadas no se detectaron hidrocarburos de fracción media (HFM) así como tampoco de fracción pesada (HFP), lo cual indica que la zona no ha sufrido contaminación importante en su historia reciente. Los datos completos se pueden consultar en el Anexo 1.

En cuanto a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), de los 15 analizados, solo se presentaron concentraciones por encima del límite de detección de cinco de ellos (Tabla 14). El promedio de concentración presentó el siguiente orden:

Acenaftileno > Benzo (b) fluoranteno > Acenafteno > Naftaleno > Fenantreno

Las concentraciones de cuatro de los HAPs encontradas en este estudio, fueron comparadas con los valores TEL (Lower Effect Threshold o Umbral Inferior de Efecto) y PEL (Probable Effect Level o Nivel de Efecto Probable) de las tablas de referencia rápida de la NOAA (Buchman, 2008). El TEL indica un valor por debajo del cual la probabilidad de observar efectos tóxicos es muy baja, mientras que el PEL indica una alta probabilidad de efectos tóxicos. Para el (b) fluoranteno estas tablas solo reportan el 20% (T20) y el 50% (T50) de probabilidad de observar efectos tóxicos, calculados en Field et al. (2002).

Tabla 14. Estadística descriptiva de las concentraciones de hidrocarburos (ppb) detectadas en muestras de sedimentos asociados a pastos marinos en la RBLP. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

INFORME FINAL

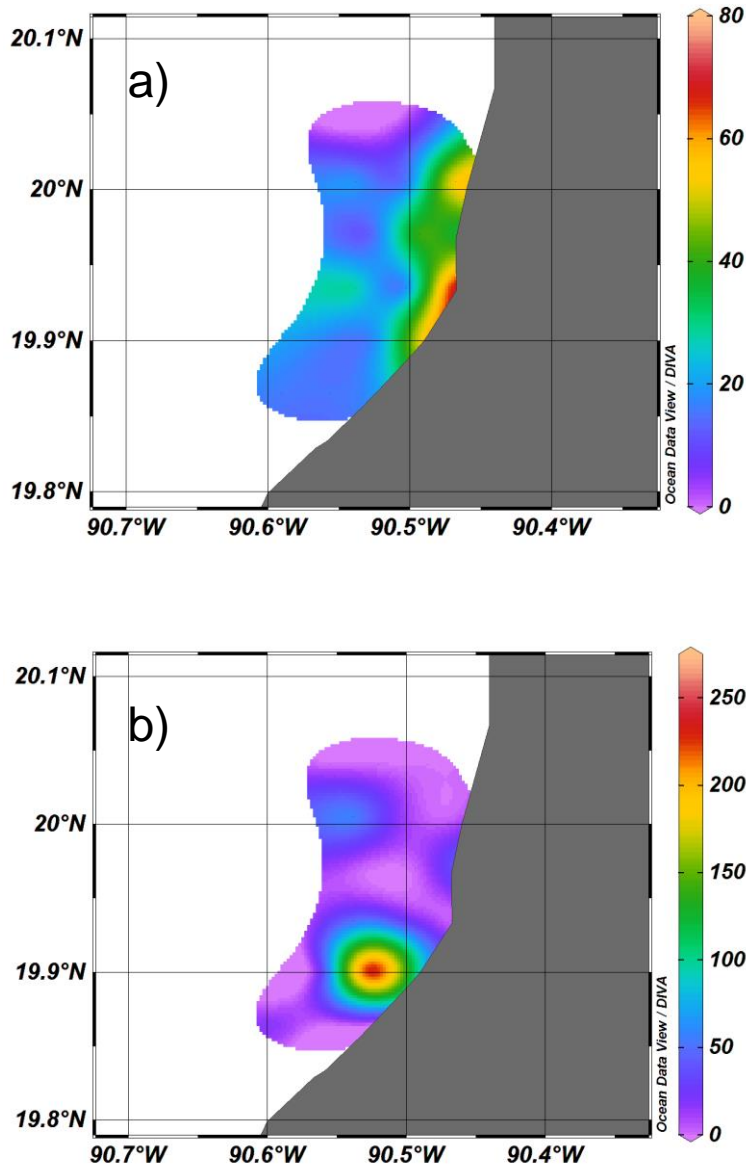
FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

	Naftaleno	Acenaftileno	Acenafteno	Fenantreno	Benzo (b) fluoranteno
PROMEDIO	10.48	65.06	27.87	8.02	47.29
MEDIA	8.67	46.76	18.95	6.32	32.47
MIN	1.88	13.03	10.25	1.90	22.00
MAX	28.19	262.49	72.30	33.38	118.98
*TEL	35	6	7	87	NA
*PEL	391	128	89	544	NA
*T20					130
*T50					1107
% DETECCIÓN	76	53	94	100	29

*Valores reportados en Buchman (2008).

Así, las concentraciones de Naftaleno y Fenantreno encontradas en los sedimentos de la RBLP están por debajo del TEL, al igual que las de Benzo (b) fluoranteno son menores que el T20 (ver tabla 14), lo que indica que no hay contaminación importante y que no existe riesgo por su presencia para los organismos acuáticos. Las concentraciones de Acenafteno (Mapa 16 a) y Acenaftileno se encuentran en su mayoría entre el TEL y el PEL indicando que hay mayor probabilidad de que este compuesto pudiera causar efectos tóxicos. Cabe destacar que solo el sitio B2 presentó un valor alto de Acenaftileno que está por encima del PEL (Mapa 16 b). De acuerdo con Perwack et al., (1982), éste último compuesto tiene su origen principalmente en la quema de madera, por lo que podemos aseverar que los sedimentos de la RBLP no presentan contaminación por actividades relacionadas con la explotación y uso excesivo de hidrocarburos del petróleo, confirmando así que la protección de este ecosistema es efectiva, al menos en este aspecto.

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.



Mapa 16. Concentraciones de a) acenafeno y b) acenaflieno en sedimento durante llluvias. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

IV.3.10 Pruebas de Correlación entre Biomarcadores y factores ambientales

La Tabla 15 muestra las correlaciones encontradas entre los parámetros fisicoquímicos y los biomarcadores, donde se observan las relaciones entre clorofilas, proteínas ($r=0.61$) y lipoperoxidación ($r=0.62$), lo cual puede ser un indicador que, en presencia de especies

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

reactivas al oxígeno, existirá deficiencia en los sistemas fotosintéticos y en la síntesis de proteínas (Aránguiz *et al.* 2009).

En los parámetros fisicoquímicos se observa como el pH tiene correlación con los biomarcadores clorofilas *a* y *b* ($r=0.64$) y proteínas ($r=0.76$), y de manera inversa con lipoperoxidación ($r=-.061$), por lo que los cambios en este parámetro podrían influir sobre dichos biomarcadores.

Se encontró correlación inversa con las concentraciones reportadas en lipoperoxidación contra clorofila *b* ($r=-0.62$) y proteínas ($r= -0.92$), y para los parámetros fisicoquímicos, salinidad ($r= 0.66$).

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 15. Correlación entre biomarcadores y parámetros ambientales en RBLP. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

	Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total	Relación <i>a / b</i>	Azúcares	Fenoles	Proteínas	Lipoperoxidación MDA
Clorofila <i>a</i>		0.86	0.97	-0.15	-0.18	-0.28	0.52	-0.46
Clorofila <i>b</i>	0.86		0.95	-0.46	-0.28	-0.28	0.67	-0.62
Clorofila total	0.97	0.95		-0.29	-0.22	-0.28	0.61	-0.55
Relación <i>a / b</i>	-0.15	-0.46	-0.29		0.33	0.24	-0.50	0.52
Azúcares	-0.18	-0.28	-0.22	0.33		0.42	-0.25	0.25
Fenoles	-0.28	-0.28	-0.28	0.24	0.42		-0.40	0.44
Proteínas	0.52	0.67	0.61	-0.50	-0.25	-0.40		-0.92
Lipoperoxidación MDA	-0.46	-0.62	-0.55	0.52	0.25	0.44	-0.92	
Temp (°C)	0.17	0.18	0.18	0.19	0.22	0.29	0.14	0.04
Salinidad (ups)	-0.28	-0.51	-0.39	0.67	0.48	0.48	-0.65	0.66
Oxígeno disuelto (mg/L)	-0.06	-0.27	-0.15	0.45	0.13	0.38	-0.49	0.59
pH	0.64	0.64	0.66	-0.32	-0.19	-0.32	0.76	-0.61
Potencial REDOX (mV)	-0.23	-0.24	-0.24	0.02	0.06	0.35	-0.40	0.37

IV.3.11 Pruebas de Correlación entre Biomarcadores y HAPs.

El análisis de correlación de los biomarcadores y los HAPs (Tabla 16) mostró que el **Acenafteno** tiene una correlación negativa con las Clorofilas A y B, y por consecuencia también con las totales (-0.22), lo que parece indicar que este hidrocarburo puede afectar la fotosíntesis; por otra parte, su correlación con azúcares y fenoles es positiva, es decir que, provoca estrés suficiente para promover la producción de metabolitos secundarios y el almacenamiento de azúcares. En el caso del **Acenaftileno** se observó una correlación positiva con la lipoperoxidación (0.23), lo cual es de esperarse ya que los HAPs producen estrés oxidativo en los organismos; así, esta respuesta metabólica puede al mismo tiempo ser la razón de la relación negativa de este HAP con el contenido de proteínas de los pastos marinos (-0.21). Un resultado similar son las correlaciones positivas del **Naftaleno** con los niveles de lipoperoxidación y la producción de azúcares (0.21 y 0.23 respectivamente) y la negativa con fenoles (0.13). El **Fenantreno** solo presentó una correlación positiva con los azúcares, pero cabe destacar que ésta fue la más alta (0.46) de todas las correlaciones. Por último, el **Benzo (b) fluoranteno** no presentó ninguna correlación significativa.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

Tabla 16. Correlaciones entre los biomarcadores y los hidrocarburos aromáticos policíclicos detectados. (Elaborado con datos obtenidos por la Dra. Patricia Ramirez R. y personal del laboratorio de Ecotoxicología).

	Clorofil a a	Clorofil a b	Clorofil a total	Relació n a / b	Azúcare s	Fenole s	Proteína s	Lipoperoxidaci ón MDA	Naftalen o	Acenaftilen o	Acenaften o	Fenantren o	Benzo (b) fluoranten o
Clorofila a	1												
Clorofila b	0.98	1											
Clorofila total	1	0.99	1										
Relación a / b	0.07	0.04	0.06	1									
Azúcares	-0.17	-0.21	-0.19	-0.18	1								
Fenoles	-0.11	-0.07	-0.09	-0.25	0.71	1							
Proteínas	-0.07	0.03	-0.03	-0.07	0.34	0.04	1						
Lipoperoxidaci ón MDA	0.05	-0.06	0.01	0.04	-0.24	-0.37	-0.97	1					
Naftaleno	0.03	-0.06	-0.01	-0.18	0.23	-0.13	-0.08	0.21	1				
Acenaftileno	-0.1	-0.08	-0.09	-0.02	-0.07	-0.02	-0.21	0.24	-0.14	1			
Acenafteno	-0.24	-0.22	-0.23	-0.07	0.21	-0.15	-0.03	0.09	0.34	0	1		
Fenantreno	-0.06	-0.03	-0.05	-0.11	0.46	0.12	0.08	-0.01	0.01	0.46	0.54	1	
Benzo (b) fluoranteno	0.04	0.05	0.04	0.04	0.01	-0.05	0.02	0.05	0.45	-0.19	0.15	-0.13	1

IV.3.12 Conclusiones

- Los resultados obtenidos de los análisis para estimar la capacidad fotosintética y fotoprotectora para conocer el estado de salud de los pastos marinos nos indican que existe una perturbación en el ambiente que está ocasionando condiciones de estrés fisiológico fotosintético en los pastos marinos localizados en los transecto A y B, así como en el sitio C1. Específicamente el sitio A1 resulta ser el punto de mayor impacto al tener la menor eficiencia cuántica y la máxima capacidad de fotoprotección.
- En este estudio se puede concluir que el área de la pradera marina con mayor vulnerabilidad a un potencial impacto ambiental se encuentra en un radio de aproximadamente 8 km del límite sur del polígono de la RBLP. Cabe mencionar que el área perturbada es el área más cercana a la ciudad de Campeche, por lo que es altamente probable que el factor o factores de estrés provengan de la zona urbana.
- Los biomarcadores mostraron que la temporada de lluvias representa el mayor estrés para los pastos marinos *Thalassia testudinum*, lo cual, en parte, es resultado del aumento en los sólidos disueltos que provocan una disminución de la penetración de la luz en la columna de agua, lo que disminuye la eficiencia fotosintética.
- Los menores niveles de estrés en los pastos marinos se presentan en la época de secas, donde las concentraciones de fenoles ($\bar{x} = 0.25$ mg/g) y azúcares ($\bar{x} = 0.26$ mg/g) son bajas con excepción de los sitios cercanos a la ciudad de Campeche.
- Los sitios cercanos a la ciudad de Campeche muestran con frecuencia que los pastos marinos se encuentran bajo la influencia de algún factor de estrés adicional, por lo que se recomienda un monitoreo más intensivo en estas áreas y la identificación de las fuentes de contaminantes.
- En lluvias y nortes se arrastran contaminantes hacia la zona costera, esto puede ser demostrado por los altos niveles de lipoperoxidación detectados, ya que el metabolismo de dichos contaminantes produce especies reactivas de oxígeno que ocasionan la oxidación de las biomoléculas de los pastos marinos.
- Los sedimentos asociados a los pastos marinos no presentan hidrocarburos de fracción media o pesada por lo que se puede concluir la RBLP no presentan contaminación por actividades relacionados con la explotación y uso excesivo de hidrocarburos del petróleo.

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Los HAPs presentes en los sedimentos asociados a los pastos marinos tienen su origen en la combustión, probablemente de madera y solo el acenafteno y el acenaftileno presentan concentraciones que pudieran causar un efecto negativo en los organismos acuáticos.
- Los valores de los biomarcadores medidos en este estudio conforman una línea base que podrá ser de utilidad para evaluar otros factores de estrés como la presencia de hidrocarburos, lo cual es probable en esta zona ya que la Reserva de Biosfera los Petenes se encuentra ubicada cerca de la Sonda de Campeche, donde actualmente se extrae petróleo y pudiera ocurrir un derrame accidental de estos contaminantes.

IV.3.13 Recomendaciones

- Se recomienda continuar con el monitoreo de las condiciones ambientales en las que se desarrollan los pastos marinos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH y potencial redox) con el fin de conocer la dinámica del sitio y su comportamiento en un periodo más extenso.
- Cuantificar nutrientes y otros contaminantes con el fin de conocer las concentraciones que existen en el medio y su influencia en los biomarcadores.
- Desarrollar bioensayos con concentraciones conocidas de la Fracción Soluble de Petróleo, con el fin de conocer las respuestas de los biomarcadores.
- Medir otros biomarcadores como carotenoides, flavonoides, catalasa, para complementar esta información.
- Cuantificar carbohidratos en rizomas para conocer más detalladamente la respuesta al estrés de los pastos marinos.

V. BIBLIOGRAFIA

- Abbott, R. T. 1974. *American Seashells; The marine Mollusca of the Atlantic and Pacific coast of North America*. 2da. Edición. Van Nostrand Reinhold. Estados Unidos. 666 p.
- Abele, L. y W. Kim. 1986. *An illustrated guide to the marine decapod crustaceans of Florida*. State of Florida Department of Environmental Regulation, technical series Vol 8, Estados Unidos, 760 p.
- Agawin, N. S. R., P. Ferriol, C. Cryer, E. Alcón, A. Busquets, E. Sintés, C. Vidal y G. Moyà. 2016. Significant nitrogen fixation activity associated with phyllosphere of Mediterranean seagrass *Posidonia oceánica*: First report. *Marine Ecology Progress Series*, 551: 53 – 62.
- Agawin, N. S. R., P. Ferriol, E. Sintés y G. Moya. 2017. Temporal and spatial variability of in situ nitrogen fixation activities associated with the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* meadows. *Limnology and Oceanography*, 62: 2575 – 2592.
- Agraz-Hernández, C. M., J. Osti-Sáenz, C. A. Chan Keb, G. Expósito-Díaz, E. Márquez-García, J. Acosta, S. Castillo-Domínguez, D. Gómez-Ramírez, J. E. Reyes-Castellanos, K. P. Conde-Medina, Y. M. Cach-Ruíz y J. G. Martínez-Kumul. 2012. *Los ecosistemas de manglar en el estado de Campeche: Diagnóstico de la conservación e identificación de áreas potenciales para la restauración*. Informe final. Fondos Mixtos del Gobierno del estado de Campeche y Ciencia y Tecnología (CONACyT-Fomix). Universidad Autónoma de Campeche. Clave 1264430, 179p.
- Aguilar-Salazar, F., J. A. González-Iturbe, A. Senties-Granados, M. Rueda, J. Herrera-Silveira, I. Olmsted, F. Remolina-Suárez, J. Martínez-Aguilar, R. Figueroa-Paz y F. Figueroa-Paz. 2003. *Batimetría, variables hidrológicas, vegetación acuática sumergida y peces de la laguna Yalahau, Quintana Roo, México*. Instituto Nacional de la Pesca, México, 22 p.
- Antia, N., P. Harrison y L. Oliveira. 1991. The role of dissolved organic nitrogen in phytoplankton nutrition, cell biology and ecology. *Phycologia*, 30: 1 – 89.
- Aránguiz, F., H. Gaete, M. E. Hidalgo y G. Lobos. 2009. Daño oxidativo en la microalga *pseudokirchneriella subcapitata* expuesta a aguas receptoras de un efluente minero en del Río Blanco (V Región, Chile). *Química Nova*, 32: 2417 – 2422.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Arnon, D. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24: 1 – 15.
- Ávalos, G. A. y E. Pérez-Urria. 2009. Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología)*. Serie Fisiología Vegetal, 2: 119-145.
- Ayala, P. L. A. 2010. *Ecosistemas marinos y costeros: Humedales costeros*. En: Villalobos-Zapata G. J. y J. Mendoza V. (Coord.). La Biodiversidad en Campeche: Estudio del Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche y El Colegio de la Frontera Sur. México, 116 – 127.
- Ayala – Pérez, L. A., S. R. Muñoz, A. L. Sosa, G. J. G. Terány O. V. Vasco. 2016. *Peces costeros de la Reserva de la Biósfera Los Petenes, Campeche*. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), México, 170 p.
- Azam, F., T. Fenchel, J. G. Field, J. S. Gray, L. A. Meyer-Reil y F. Thingstad. 1983. The Ecological Role of Water-Column Microbes in the Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 10: 257 – 263.
- Barba, E. y A. J. Sánchez. 2005. Peracarid crustaceans of central Laguna Madre Tamaulipas in the southwestern Gulf of Mexico. *Gulf of Mexico Science*, 23: 241-247.
- Baker, N. R. 2008. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo*. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 89 – 113.
- Bayari, C. S., N. N. Ozyurt, M. OZtam, Y. Bastanlar, G. Varinlioglu, H. Koyuncu, H. Ulkenli y S. Hamarat. 2011. Submarine and coastal karstic groundwater discharges along the southwestern Mediterranean coast of Turkey. *Hydrogeology Journal*, 19: 399 – 414.
- Beer S, Vilenkin B, Weill A, Vesté M, Susel L y Eshel A. 1998. Measuring Photosynthetic rates in seagrasses by pulse amplitude modulated (PAM) fluorometry. *Marine Ecology Progress Series*, 174: 293 – 300.
- Borum, J., K. Sand-Jensen, T. Binzer, O. Pedersen y T. M. Greve. 2006. *Oxygen Movement in Seagrasses*. *Seagrasses: biology, ecology and conservation*. Springer, Dordrecht, Holanda pp. 255 – 270.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Botello, A. V. 2005. *Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias: Características Composición y Propiedades Fisicoquímicas del Petróleo. 2da Edición.* Universidad Autónoma De Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología, Mexico. pp. 262-265.
- Bousfield, E. L. 1973. *Shallow water gammaridean Amphipoda of New England,* Comstock R. Associated, Estados Unidos.
- Bradford, M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72: 248 – 254.
- Bravo-Tzompantzi, D., M. E. Caso-Muñoz, A. Laguarda-Figueras, F. A. Solís-Marín, B. E. Buitron-Sánchez y M. Abreu-Pérez. 2000. *Equinodermos (Echinodermata: Echinoidea) fósiles y recientes del Golfo y Caribe Mexicano.* Gobierno de Campeche. México, 101 p.
- Bruinsma, J. 1963. The quantitative analysis of chlorophyll a and b in plant extracts. *Protochemistry and Photobiology*, 2: 241-249.
- Buege, J. A. y S. D. Aust. 1978. Microsomal lipid peroxidation. *Methods in Enzymology*, 53: 302 – 310.
- Buchman, M. F. 2008. *NOAA Screening Quick Reference Tables. NOAA OR & R Report 08-1.* Office of Response and restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, Estados Unidos, 34 p.
- Burgos – León, A. M., D. Valdés, M. E. Vega y O. Defeo. 2013. Spatial structuring of submerged aquatic vegetation in an estuarine hábitat on the Gulf of Mexico. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 93: 855 – 866.
- Cabello-Pasini, A., R. Muñoz-Salazar y D. H. Ward. 2004. Caracterización bioquímica del pasto marino *Zostera marina* en el límite sur de su distribución en el Pacífico Norte. *Ciencias Marinas*, 30: 21 – 34.
- Cajaraville, M. P., I. Cancio, A. Ibabe y A. Orbea. 2003. Peroxisome proliferation as a biomarker in environmental pollution assessment. *Microscopy proliferation as a biomarker in environmental pollution assessment*, 61: 191 – 202.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Campbell, J. E., L. A. Yarbro y J. W. Fourqurean. 2012. Negative relationships between the nutrient and carbohydrate content of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Aquatic Botany*, 99: 56-60.
- Capurro, L. 2002. A large coastal ecosystem: the Yucatan Peninsula. *Advances and Perspectives*, 22: 69 – 75.
- Carrera P. L. y V. S. Salazar. 1997. Eucínidos (Polychaeta) del caribe mexicano con claves para las especies del Gran Caribe: *Eunice*. *Revista de Biología Tropical*, 45: 1499 – 1521.
- Caso-Muñoz M. E., F. A. Laguarda F. A. Marín-Solís. 1994. Contribución al conocimiento de la ecología de la comunidad de equinodermos de la laguna de Términos Campeche, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 21: 67 – 85.
- Celdran, D. 2017. Photosynthetic activity detected in the seed epidermis of *Thalassia testudinum*. *Aquatic Botany*, 136: 39 – 42.
- Cervantes-Martínez, A., M. Elías-Gutiérrez y E. Suárez-Morales. 2002. Limnological and morphometrical data of eight karstic systems “cenotes” of the Yucatan Peninsula, Mexico, during the dry season (February – May, 2001). *Hydrobiologia*, 482: 167 – 177.
- Chace, F. A. 1972. *The Shrimps of the Smithsonian-Bredin Caribbean Expeditions with a Summary of the West Indian Shallow-water Species (Crustacea: Decapoda: Natantia)*. Smithsonian Contributions to Zoology, Estado Unidos, pp. 98 – 178.
- Chapin, F. S., S. Ernst-Detlef y H. A. Mooney. 1990. The ecology and economics of storage in plants. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 21: 423 - 447.
- Clark, T. S. y P.B. Robertson. 1982. Shallow water marine isopods of Texas. *Contributions in Marine Science*, 25: 45 – 59.
- Cole, A. M., M. J. Durako y M. O. Hall. 2018. Multivariate Analysis of Water Quality and Benthic Macrophyte Communities in Florida Bay, USA Reveals Hurricane Effects and Susceptibility to Seagrass Die-Off. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1 – 16.
- CONAGUA. 2017. <https://www.gob.mx/conagua>

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

CONAGUA, 2018. Información Climatológica por Estado.

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2015.pdf>

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). Sin fecha. La Reserva de la Biosfera Los Petenes. "Habitats únicos y relevantes para la fauna". <http://www.conanp.gob.mx/conanp/dominios/petenes/index.php#.XTtxS-gzblU>

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). 2004. *SIG. Mapoteca.*

Sitios RAMSAR,

http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/imgmapoteca/map_ramsar/mapas/RAMSAR_Petenes_2004.jpg.

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas). 2006. *Programa De Conservación Y Manejo Reserva de la Biosfera Los Petenes. México.* Dirección General de Manejo para la Conservación, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.

Connolly, R. M. 2009. *Seagrass.* En: Poloczanska, E. S., A. J. Hobday, A. J. Richardson (eds.). *A Marine Climate Change Impacts and Adaptation Report Card for Australia.* NCCARF Publication, Australia, pp. 8.

Cruz-Ábrego, F. M. 1984. *Sistemática y algunos aspectos ecológicos de los moluscos de la Sonda de Campeche, México.* Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, 123 p.

Cruz-Ábrego, F., A. P. Hernández y V. S. Weiss. 1994. Estudios de la fauna de poliquetos (Annelida) y moluscos (Gastropoda y Bivalvia) asociada con ambientes de pastos marinos (*Thalassia testudinum*) y manglares (*Rhizophora mangle*) en la laguna de Términos, Campeche, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 21: 1 – 13.

De Falco G., P. Magni, L. M. H. Teräsvuori, G. Matteucci. 2004. Sediment grain size and organic carbon distribution in the Cabras Lagoon (Sardinia, Western Mediterranean). *Chemistry & Ecology* 20: 367 – 377.

Diario Oficial de la Federación. 1999. *Decreto por el que se declara área natural protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región del estado de Campeche conocida como Los Petenes, con una superficie total de 282,857 hectáreas.* DOF: 24/05/1999.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Dodds, W. K. 2006. Nutrients and the “dead zone”: the link between nutrient ratios and dissolved oxygen in the northern Gulf of Mexico. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4: 211 – 217.
- Duarte, C. M. 1995. Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes. *Ophelia*, 41: 87 – 112.
- Dubois M., K. A. Gilles, J. K. Hamilton, P. A. Rebers y F. Smith. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28: 350 – 356.
- Ekdale, A. A. 1974. Marine molluscs from shallow-water environments (0 to 60 meters) of the northeast Yucatan coast. *Bulletin of marine Science*, 24: 638 – 668.
- Eklöf, J. S., M. Gullström, M. Björk, M. E. Asplund, L. Hammar, A. Dahlgren y M. C. Ohman. 2008. The importance of grazing intensity and frequency for physiological responses of the tropical seagrass *Thalassia hemprichii*. *Aquatic Botany*, 89: 337 - 340.
- Enriquez, S. y M. A. Borowitzka. 2010. *The Use of the Fluorescence Signal in Studies of Seagrasses and Macroalgae*, en: Sugget D., O. Prasil y M. A. Borowitzka (Eds). Chlorophyll a Fluorescence in Aquatic Sciences: Methods and Applications, Developments in Applied Phycology. Springer, Estados Unidos, pp. 187 – 208.
- Environmental Protection Agency, 1986. *Quality Criteria for Water*. Office of Water Regulations and Standards. Estados Unidos, 395 p.
- Fauchald, K. 1977. *The polychaete worms, definitions and keys to the orders, families and genera*. Natural History Museum of Los Angeles County: Estados Unidos Science Series Vol 28:1 – 188.
- Felder, D. L. 1973. *An annotated key to crabs and lobsters (Decapoda:Reptantia) from coastal waters of the northwestern Gulf of México*. Louisiana State University, Estados Unidos, 112 p.
- Figueroa, F. L. & Gómez, I. (2001) Photosynthetic acclimation to solar UV radiation of marine red algae from the warm-temperate coast of southern Spain: a review. *Journal of Applied Phycology*, 13: 235 – 248.
- Figueroa, F. L., R. Conde-Álvarez e I. Gómez. 2003. Relations between electron transport rates determined by pulse amplitude modulated chlorophyll fluorescence and

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

oxygen evolution in macroalgae under different light conditions. *Protosynthesis Research*, 75: 259 – 275.

Fourqurean, J. W., R. D. Jones y J. C. Zieman. 1993. Processes influencing water column nutrient characteristics and phosphorus limitation of phytoplankton biomass in Florida Bay, FL. USA: inferences from spatial distributions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36: 295 – 314.

Frankovich, T. A. y J. W. Fourqurean. 1997. Seagrass epiphyte loads along a nutrient availability gradient, Florida Bay, USA. *Marine Ecology Progress Series*, 159: 37 – 50.

Fuentes, S. A., M. E. Gallegos y M. C. Mandujano. 2014. Demografía de *Cualerpa paspaloides* var. *Wudermannii* (Bryopsidales: Caulerpaceae) en la zona costera de Campeche, México. *Revista de Biología Tropical*, 62: 729 – 741.

Gallegos, M. E., M. Merino, N. Marbá y C. M. Duarte. 1993. Biomass and dynamics of *Thalassia testudinum* in the Mexican Caribbean: elucidating rhizome growth. *Marine Ecology Progress Series*, 95: 185 – 192.

Gallegos, M. E. 2010. *Pastos Marinos*. En: Villalobos-Zapata G. J. y J. Mendoza V. (Coord.). La Biodiversidad en Campeche: Estudio del Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche y El Colegio de la Frontera Sur. México, 204 – 209.

García, E. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climatológica de Köopen adaptada para la República Mexicana*. Offset Larios, México, 256 p.

García-Cubas, A. 1981. Moluscos de un sistema lagunar tropical en el sur del Golfo de México (Laguna de Términos, Campeche). *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, Publ. Esp: 1-182.

García-Hernández, V. D. y U. Ordóñez-López. 2006. Los peces juveniles de la laguna Yalahau, Quintana Roo. Memorias del XIV Congreso Nacional de Oceanografía. Manzanillo, Col.

García-Mendoza, E., H. Ocampo-Alvarez y Govindjee. 2011. Photoprotection in the brown alga *Macrocystis pyrifera*: Evolutionary implications. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 104: 337 – 385.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- García-Montes, J. F. 1985. *Aspectos biológicos de las especies de cangrejos Portúnidos del Suroeste del Golfo de México*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 105 p.
- Granados-Barba, A. 1994. *Estudio sistemático de los poliquetos (Cannelida: Polychaeta) de la región de plataformas petroleras del Sur del Golfo de México*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, 284 pp.
- Gaudette, H., W. L. Flight, L. Toner y D. Folger. 1974. An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44: 249 – 253.
- Genty, B., J. M. Briantais y N. R. Baker. 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta – General Subjects*, 990: 87 – 92.
- HACH. 1992. *Water Analysis Handbook*. HACH Company, Estados Unidos, 220 p.
- Herbert, A., L. Guilhermino, H. C. da Silva de Assis y P. D. Hansen, P. D. 1995. Acetylcholinesterase activity in aquatic organisms as pollution biomarker. *Z Zeitschrift für Angewandte Zoologie*, 3: 1 – 15.
- Hemminga, M. y C. M. Duarte. 2008. *Seagrass ecology*. Cambridge. Estados Unidos, 298 p.
- Kahn, A. E. y M. J. Durako. 2006. *Thalassia testudinum* seedling responses to changes in salinity and nitrogen levels. *Experimental Marine Biology and Ecology* 335: 1 – 12.
- Kaupilla, P., J. J. Meeuwig y H. Pitkänen. 2003. Predicting oxygen in small estuaries of the Baltic Sea: a comparative approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57: 1115 – 1126.
- Kennedy K., T. Schroeder, M. Shaw, D. Haynes, S. Lewis, C. Bentley, C. Paxman, S. Carter, V. E. Brando, M. Bartkow, L. Hearn y J. F. Mueller. 2012. Long term monitoring of photosystem II herbicides - Correlation with remotely sensed freshwater extent to monitor changes in the quality of water entering the Great Barrier Reef, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 65: 292 – 305.
- Kensley, B. y M. Schotte. 1989. *Guide to the Marine Isopod Crustaceans of the Caribbean*. Smithsonian Institution Press, Estados Unidos, 324 p.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Kim, K. H., J. W. Heiss, H. A. Michael, W. J. Cai, T. Laattoe, V. E. A. Post y W. J. Ullman. 2017. Spatial Patterns of Groundwater Biogeochemical Reactivity in an Intertidal Beach Aquifer. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122: 2548 – 2562.
- Klima, E.F. 1976. *Marine molluscan general of Western Nort America. An illustrate key*. 2° Edición. Standford University Press, Estados Unidos, 208 p.
- Korhonen, L. K., V. Macías-Carranza, R. Abdala, F. L. Figueroa y A. Cabello-Pasini. 2012. Efecto de la concentración del sulfuro, pH y anoxia sobre la fotosíntesis y respiración de *Zostera marina*. *Ciencias marinas*, 38: 625 – 633.
- Kumar K. S., H. W. Dahms, J. S. Lee, H. C. Kim, W. C. Lee y K. H. Shin. 2014. Algal photosynthetic responses to toxic metals and herbicides assessed by chlorophyll a fluorecence. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 104: 51-71.
- Ledoyer, M. 1986. Etude de la faune vague des herbiers superficiels de Zosterracees et de quelques biotopes d'algues littorales. Recl. Trans. Stn. Mar. Endoume 25 :117 - 235.
- Lee, K. S. y K. H. Dunton. 1997. Effect of in situ light reduction on the maintenance, growth and partitioning of carbon resources in *Thalassia testudinum* banks ex König. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 210: 53 – 73.
- Lee, K. S., S. R. Park e Y. K. Kim. 2007. Effects of irradiance, temperatura, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: A review. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350: 144 – 175.
- Libes, S. 2009. *Introduction to Marine Biogeochemistry*. Segunda Edición. Academic Press. Inglaterra. 909 p.
- Liu, Y., J. J. Jiao y W. Liang. 2018. Tidal Fluctuation Influenced Physicochemical Parameter Dynamics in Coastal Groundwater Mixing Zone. *Estuaries and Coasts*, 41: 988 – 1001.
- Marbá, N. y C. M. Duarte. 2001. Growth and sediment space occupation by seagrass *Cymodocea nodosa* roots. *Marine Ecology Progress Series*, 224: 291 – 298.
- Martínez-López, B. y J. Zavala-Hidalgo. 2009. Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, 77: 1 – 20.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Mazzela, I. y R. S. Alberte. 1986. Light adaptation and the role of autotrophic epiphytes in primary production of the temperate seagrass, *Zostera marina*. L. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 100: 165 – 180.
- Merino, M. 1997. Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems*, 13: 101 – 121.
- Mendoza, J. y V. Kú. 2010. *Clima*. En: Villalobos-Zapata, G. J. y J. V. Mendoza (Coord.). La biodiversidad en Campeche: Estudio de estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur, México, 16 – 19 pp.
- Mijangos-Hernandez, A. I. 2018. *Análisis de la productividad de Thalassia testudinum Banks ex Koenig y su relación con los factores ambientales de la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana, México, 76 p.
- Murata, N., S. Takahashi, Y. Nishiyama y S. I. Allakhverdiev. 2007. Photoinhibition of photosystem II under environmental stress. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1767: 414 – 421.
- Murrell, M. C. y J. C. Lehrter. 2011. Sediment and Lower Water Column Oxygen Consumption in the Seasonally Hypoxic Region of the Louisiana Continental Shelf. *Estuaries and Coasts*, 34: 912 – 924.
- Nishiyama Y., S. I. Allakhverdiev y N. Murata. 2006. A new paradigm for the action of reactive oxygen species in the photoinhibition of photosystem II. *Biochimica et Biophysica*, 1757: 742 – 749.
- Ocampo-Alvarez H., E. García-Mendoza y Govindje 2013. Antagonist effect between violaxanthin and de-epoxidated pigments in nonphotochemical quenching induction in the qE deficient brown alga *Macrocystis pyrifera*. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1827: 427-437.
- Orth, R. J., T. J. B. Carruthers, W. C. Dennison, C. M. Duarte, J. W. Fourqurean, K. L. Heck, A. R. Hughes, G. A. Kendrick, W. J. Kenworthy, S. Olyarnik, F. T. Short, M. Waycott y S. L. Williams. 2006. A Global Crisis for Seagrass Ecosystems. *BioScience*, 56: 987 – 996.
- Ortiz, M., A. Martín, I. Winfield, Y. Díaz y D. Atienza. 2004. *Anfípodos (Crustacea: Gammaridea): clave gráfica para la identificación de las familias, géneros y especies*

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

marinas y estuarinas del Atlántico occidental tropical. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 162 p.

Papageorgiou, G. y C. Govindjee. 2004. *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis*. *Advances in Photosynthesis and Respiration*. Vol. 19. Springer, Holanda, 793 p.

Perez, P. E., G. Ettine, E. Marín, A. Casassa, P. N. Silva, J. Raga, C. González, L. Sandoval y D. Medina. (2014). Determinación de Fenoles y Flavonoides totales en hojas de guayaba (*Psidium guajava* L.). *CESID-Frutícola y Apícola*, 31: 60 – 77.

Pérez-Farfante, I. 1970. Claves ilustradas para la identificación de los camarones comerciales de la América Latina. *Anales de Instituto Nacional de Investigación Biológica y Pesquera, México*, 48: 3.

Pérez-Farfante, I. 1997. Penaeid and Sergestoid shrimps and prawns of the World. Keys and diagnosis for the families and genera. *Bulletin du Muséum National d'histoire Naturelle*, 175: 1 – 233.

Pérez-Rodríguez, R. 1980. *Moluscos de la Plataforma Continental del Golfo de México y Caribe Mexicano*. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, 339p.

Perwack J., M. Byrne, S. Coons, M. Goyer, J. Harris, P. Cruse, R. deRosier, K. Moss y S. Wendt. 1982. *An exposure and risk assessment for benzo[u]pyrene and other polycyclic aromatic hydrocarbons*. Volume IV. *Benzo[u]pyrene, acenaphthylene, benz[a]anthracene, benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoroanthene, benzo[g,h,i]perylene, chrysene, dibenz[u,h]anthracene, and indeno[1,2,3-c,ap]yrene*. US Environmental Protection Agency, Office of Water Regulations and Standards. Estados Unidos, EPA 440/4-85-020-V4.

Piña, A. C. 1980. *Moluscos colectados en la Sonda de Campeche*. Secretaría de Marina. México, 98 p.

Por, F. D. 1972. Hydrobiological notes on the high-salinity waters of the Sinai Peninsula. *Marine Biology*, 14: 111 – 119.

Rabalais, N. N. 2002. Nitrogen in Aquatic Ecosystems. *Ambio*, 31: 102- 112

Ramírez, R., M. Guzmán, E. Barrera y G. Miranda. 2010. *Manual de Procedimientos de Operación Estándares (MPOE) para la toma de muestras, su análisis*

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

ecotoxicológico e histológico dentro del marco del Programa Nacional de Monitoreo y Evaluación de sustancias tóxicas persistentes (PRONAME). UAMI /CCA/SEMARNAT, México,

- Reguero-Reza, M.M. 1994. *Estructura de la comunidad de moluscos en lagunas costeras de Veracruz y Tabasco, México.* Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México, 278 p.
- Rice, E. H. y L. S. Konicker. 1962. Mollusks of Alacran reef, Campeche Bank, México. *Publications of the Institute of Marine Science.* 8: 366 – 463.
- Salas-Monreal, D., J. J. Salas-Pérez, D. A. Salas de León, M. A. Monreal-Gómez, H. Pérez-España, L. D. Ortiz-Lozano, A. Granados-Barba, M. L. Riverón-Enzástiga y C. A. Villegas – Sánchez. 2017. Corrientes superficiales dentro del corredor arrecifal del Suroeste del Golfo de México. *UVserva*, 3: 32 – 36.
- Sand – Jensen, K. y N. P. Revsbech. 1987. Photosynthesis and light adaptation in epiphyte-macrophyte associations measured by oxygen microelectrodes. *Limnology and Oceanography*, 32: 452 – 457.
- Schultz, G. A. 1969. *How to know the marine isopod crustaceans.* Wm. C. Brown Publishers, Estados Unidos, 359 pp.
- SCOR/UNESCO, 1980. *Determination of chlorophyll in seawater.* UNESCO Technical Papers in Marine Science, Estados Unidos, 35 p.
- Short, F. T. y H. A. Neckles. 1999. The effects of global climate change on seagrasses. *Aquatic Botany*, 63: 169 – 196.
- Smith, R. D., A. M. Pregnall y R. S. Alberte. 1988. Effects of anaerobiosis on root metabolism of *Zostera marina* (eelgrass): implications for survival in reducing sediments. *Marine Biology* 98: 131 – 141.
- Solarte, M. E., M. Leonardo y L. M. Melgarejo. 2005. *Fotosíntesis y Pigmentos Vegetales.* Colombia: Laboratorio de fisiología y bioquímica vegetal. Departamento de biología. Universidad Nacional de Colombia, pp. 107-122.
- Strack, D. 1997. *Phenolic metabolism.* En: Dey, P. M. y J. B. Harborne (Eds.) *Plant Biochemistry.* Academic Press, Inglaterra, pp. 387-416.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Swain T. A. y W. E. Hills. 1959. The phenolic constituents of *Prunus domestic*. I.-The quantitative analysis of phenolic constituents. *Science of Food and Agriculture*, 10: 63 -68.
- Szymczycha, B., K. D: Kroeger y J. Pempkowiak. 2016. Significance of groundwater discharge along the coast of Poland as a source of dissolved metals to the southern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 109: 151 – 162.
- Terrados, J., C. Duarte, M. Kamp-Nielsen, N. S. R. Agawin, E. Garcia, D. Lacap, M. D. Fortes y J. Borum. 1999. Are seagrass growth and survival constrained by the reducing conditions of the sediment. *Aquatic Botany*, 65: 175 – 197.
- Tomasko, D. A. y B. E. Lapointe. 1991. Productivity and biomass of *Thalassia testudinum* as related to wáter column nutrient availability and epiphyte levels: field observations and experimental studies. *Marine Ecology Progress Series*, 75: 94 – 117.
- Valdéz-Cruz, F. 2016. *Metales traza en poblaciones de pastos marinos (Thalassia testudinum) en la costa de la Reserva de la Biósfera Los Petenes en el Golfo de México*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, México, 84 p.
- Varona-Cordero, F., F. J. Gutiérrez-Mendieta y V. H. Rivera-Monroy. 2014. In situ response of phytoplankton to nutrient additions in a tropical coastal lagoon, (La Mancha, Veracruz, Mexico). *Estuaries and Coasts*, 37: 1353 – 1375.
- Viaroli, P. y R. R. Christian. 2003. Description of trophic status, hyperautotrophy and dystrophy of a coastal lagoon through a potential oxygen production and consumption index – TOSI: Trophic Oxygen Status Index. *Ecological Indicators*, 3: 237 – 250.
- Vokes H. E. y F. H. Vokes, 1983. *Distribution of shallow-water marine Mollusca, Yucatan Peninsula, Mexico*. Middle American Research Institute Publication. Estados Unidos, 183 p.
- Walker, D. I 1991. The effect of sea temperature on seagrasses and algae on the Western Autralian coastline. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 74: 71 – 77.
- Waycott, M., C. M. Duarte, T. J. B. Carruthers, R. J. Orth, W. C. Dennison, S. Olyarnik, A. Calladine, J. W. Fourqurean, K. L. Heck Jr., A. R. Hughes, G. A. Kendrick, W. J. Kenworthy, F. T. Short y S. L. Williams. 2009. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Unites States of America*, 106: 12377 – 12381.

INFORME FINAL

FORTALECIMIENTO DE LA LÍNEA BASE DEL GOLFO DE MÉXICO: INDICADORES DEL ESTADO DE SALUD DE LAS COMUNIDADES DE PASTOS MARINOS EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA LOS PETENES, CAMPECHE.

- Wear, D. J., M. J. Sullivan, A. D. Moore y D. F. Millie. 1999. Effects of water-column enrichment on the production dynamics of three seagrass species and their epiphytic algae. *Marine Ecology Progress Series*, 179: 201 – 213.
- Webber-Scannell, P. K. y L. K. Duffy. 2007. Effects of Total Dissolved Solids on Aquatic Organisms: A Review of Literature and Recommendation for Salmonid Species. *American Journal of Environmental Sciences*, 3: 1 – 16.
- Webster, I. T., P. W. Ford y B. Hodgson. 2002. Microphytobenthos Contribution to Nutrient-phytoplankton Dynamics in a Shallow Coastal Lagoon. *Estuaries*, 25: 540 – 551.
- Welsh, D. T. 2000. Nitrogen fixation in seagrass meadows: Regulation, plant-bacteria interactions and significance to primary productivity. *Ecology letters*, 3: 58 – 71.
- Wilson K. G. y P. J. Ralph. 2012. Laboratory testing protocol for the impact of dispersed petrochemicals on seagrass. *Marine Pollution Bulletin*, 64: 2421 – 2427.
- Williams, A. B. 1984. *Shrimps, lobsters and crabs of the Atlantic Coast of the Eastern U.S. Marine to Florida*. Smithsonian Institution Press. Estados Unidos, 550 p.
- Winfield, I., E. Escobar-Briones y F. Álvarez. 2007. *Clave para la identificación de los anfípodos bentónicos del golfo de México y el sector norte del mar Caribe*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México, 197 p.
- Zavala-Hidalgo, J., A. Gallegos-García, B. Martínez-López, S. L. Morey y J. J. O'Brien. 2006. Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean Dynamics*, 56: 333 – 338.
- Zieman, J. C. 1975. Seasonal variation of turtle grass, *Thalassia testudinum* König, with reference to temperature and salinity effects. *Aquatic Botany*, 1: 107 – 123.